Sizce Neden?

Kuzey Kutbu Fecri, başka bir deyişle, Kuzey ışınımlarının Alaska'da Fairbanks'a yakın bir yerde çekilmiş bir resmi. Böylesine güzel fecir (tan yeri gibi) gösterimleriyle uzak kuzey ve güney enlemlerde sıkça, fakat orta enlemlerde nadiren karşılaşılır. Bu göz alıcı ışık perdelerinin nedeni nedir ve neden yalnız Dünya'nın kuzey ve güney kutuplarına yakın yerlerde görülebilirler? *(George Lepp/Tony Stone Görüntüleri)*

bölüm

29 Manyetik Alanlar

Bölüm İçeriği

29.1 Manyetik Alan

29.2 Akım Taşıyan Bir İletkene Etkiyen Manyetik Kuvvet

29.3 Düzgün bir Manyetik Alan İçerisindeki Akım İlmeğine Etkiyen Tork

29.4 Yüklü Bir Parçacığın Düzgün Bir Manyetik Alan İçerisindeki Hareketi

29.5 *(Seçmeli)* Bir Manyetik alan İçerisinde Hareket Eden Yüklü Parçacıklarla İlgili Uygulamalar

29.6 *(Seçmeli)* Hall Olayı

Bir çok bilim tarihçisi, Arab ya da Hind icadı olan ve manyetik bir iğneden oluşan pusulanın M.Ö 13 üncü asırda Çin'de kullanıldığına inanırlar. Yunanlıların M.Ö 800 yıllarında manyetizma hakkında bilgileri vardı. Manyetit Taşının (Fe_3O_4) demir parçalarını çektiğini keşfettiler. Efsaneye göre *Manyetit** adı, sürüsünü otlatırken ayakkabısının çivileri ve sopasının ucu büyük manyetit parçalarına yapışıp kalan Magnes adlı çobandan gelmektedir.

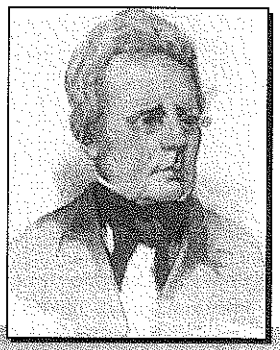
1269 da Pierre de Maricourt, doğal küresel bir mıknatıs yüzeyinin çeşitli noktalarına bir iğne yerleştirerek iğnenin aldığı yönlerin haritasını elde etti. Yönlerin, kürenin çap boyunca karşılıklı iki noktasından geçen ve küreyi kuşatan çizgiler oluşturduklarını gördü. Bu noktalara mıknatısın *kutupları* adını verdi. Daha sonraki deneyler, şekli ne olursa olsun her mıknatısın *kuzey* ve *güney kutup* denen iki kutbu olduğunu gösterdi. Bu kutuplar, elektrik yükleri gibi birbirleri üzerine kuvvet etki ettirirler. Bir başka deyişle benzer kutuplar birbirlerini iterler, zıt kutuplar ise birbirlerini çekerler. Kutuplar adlarını, bir mıknatısın Dünya'nın manyetik alanı içerisindeki davranış biçiminden aldı. Bir çubuk mıknatıs orta noktasından asılır ve yatay bir düzlemde serbestçe salınabilirse, kuzey kutbu Dünya'nın coğrafik Kuzey Kutbunu Güney Kutbu ise Dünya'nın coğrafik Güney Kutbunu gösterinceye kadar dönecektir.[1] (Aynı fikir basit bir pusulanın yapımında da kullanılır.)

1600'de William Gilbert (1540-1603) Maricourt'un deneylerini çeşitli maddeler kullanarak yaptı. Bir pusula iğnesinin belli bir hedefe yöneldiği gerçeğini kullanarak dünyanın büyük sürekli bir mıknatıs olduğunu önerdi. 1750'de deneyciler manyetik kutupların birbirleri üzerine çekici ya da itici kuvvetler etki ettirdiklerini ve bu kuvvetlerin etkileşen kutupların arasındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermek için bir burulma terazisi kullandılar. İki manyetik kutup arasındaki kuvvet, iki elektrik yükü arasındaki kuvvete benzemekle birlikte önemli bir fark vardır. Elektrik yükleri birbirlerinden ayrılabilir. (elektron ya da proton gibi), buna karşın **şimdiye kadar tek başına bir manyetik kutup oluşturulamadı**. Yani, **manyetik kutuplar her zaman çifler halinde bulunurlar**. Şimdiye kadar yalıtılmış bir manyetik kutubu algılamak için yapılan tüm çabalar başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bir sürekli mıknatısın kaç kere kesildiği hiç önemli değildir, her parçanın mutlaka bir kuzey ve bir de güney kutbu vardır. (Manyetik *tek kutupların*-yalıtılmış kuzey ya da güney kutupların-doğada bulunabileceği konusunda kuramsal temelli bazı tahminler var ve onların var olup olmadığını algılama çabaları güncel araştırmaların deneysel yönünü oluşturmaktadır).

Elektrik ve manyetizma arasındaki ilişki, 1819 da Danimarkalı bilimadamı Hans Christian Oersted'in bir gösteri deneyi sırasında üzerinden elektrik akımı geçen bir telin yakınında duran bir pusula iğnesini saptırdığını bulması ile keşfedildi.[2] Bundan kısa bir süre sonra, André Amperè (1775-1836) akım-taşıyan bir elektriksel iletkenin diğerine uyguladığı manyetik kuvveti hesaplamak için gerekli nicel yasaları elde etti. Aynı zamanda *tüm* manyetik olayların molekül büyüklüğündeki akım ilmeklerinden kaynaklandığını da önerdi.

1820'lerde, Faraday ve ondan bağımsız olarak Joseph Henry (1797–1878) elektrik akımı ile manyetizma arasındaki başka ilişkileri de gösterdiler. Bir

Tonlarca metal kırıntılarını taşımak için bir elektro mıknatısın kullanışı (*Jeffrey Sylvester/ FPG Uluslararası*)



Hans Christian Oersted
Danimarkalı fizikçi (1777–1851)
(North Wind Resim Arşivinden)

[1] Dünyanın coğrafik Kuzey Kutbunun manyetik olarak bir güney kutup, buna karşın coğrafik Güney Kutbunun manyetik olarak Kuzey Kutup olduğuna dikkat ediniz. *Zıt* manyetik kutuplar birbirlerini çektikleri için, mıknatısın Dünya'nın coğrafik kuzey kutbuna doğru çekilen kutbu manyetik *kuzey* kutbu ve Dünya'nın güney kutbuna doğru çekilen kutbu ise manyetik güney kutbudur.

[2] Aynı buluşun 1802 de bir İtalyan hukukçu, Gian Dominico Romognosi tarafından yayınladığını, fakat makale saygın bir dergi yerine *Gazetta de Trentino* isimli bir gazetede yayınlandığı için önem verilmediğini belirtmek ilginç olur.

devre yakınında bulunan bir mıknatısı hareket ettirerek ya da yakınındaki bir devredeki akımı değiştirerek bir elektrik akımı oluşturulabileceğini gösterdiler. Bu gözlemler, değişen bir manyetik alanın bir elektrik alanı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Yıllarca sonra, Maxwell'in kuramsal çalışması, değişen bir elektrik alanının da bir manyetik alan oluşturduğunu gösterdi.

Elektrik ve manyetik olaylar arasındaki benzerlik, sürekli mıknatısları yapma yöntemlerini sağladı. Bölüm 23'de lastik ve yünün birbirlerine sürtüldüklerinde her ikisinin de yük edindiklerini — birinin pozitif ve diğerinin negatif— öğrendik. Benzer şekilde mıknatıslanmamış bir demir parçası, bir mıknatısla okşanarak mıknatıslanabilir. Manyetizma, demirde (ve diğer malzemelerde) başka yöntemlerle de oluşturulabilir. Örneğin, mıknatıslanmamış bir demir parçası kuvvetli bir mıknatısın yakınına dokunmayacak biçimde yerleştirilirse, sonunda mıknatıslanmış duruma geçer.

Bu bölüm, bir manyetik alan içerisindeki hareketli yüklere ve akım taşıyan tellere etkiyen kuvvetleri incelemektedir. Manyetik alanın kendisinin kaynağı Bölüm 30 da tanıtılmaktadır.

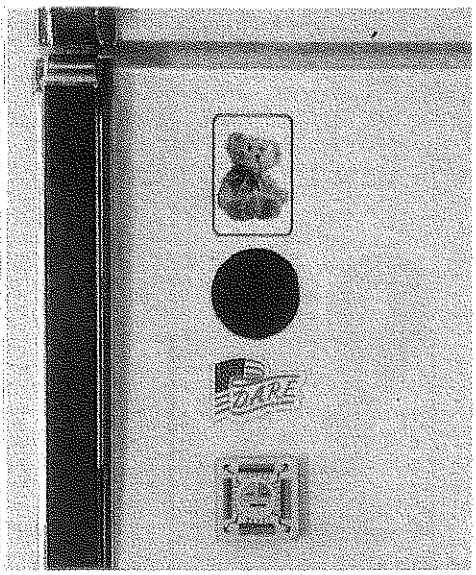
Ev Deneyi

Demir ya da çelik, zayıf bir manyetik alan (Dünyamızdan kaynaklanan gibi) içerisine yeterince uzun bir süre bırakılırsa mıknatıslanabilir. Bir pusula kullanılarak, aynı yerde yıllarca duran bir çelik dolap, bir dökme demir radyatör veya demir içeren bir metalin yakınındaki manyetik alanı algılayıp algılamadığınıza bakın.

29.1 MANYETİK ALAN

12.2

Elektriği öğrenirken yüklü cisimler arasındaki etkileşimleri elektrik alanları ile betimledik. Herhangi bir duran ya da hareket eden yüklü parçacığın etrafını bir elektrik alanın sardığını anımsayın. Bölüm 30 da göreceğimiz gibi, herhangi bir *hareketli* elektrik yükünün çevresindeki uzay bölgesi elektrik alana ek olarak bir de manyetik alan içerir. Herhangi bir manyetik maddeyi de saran bir manyetik alan vardır.

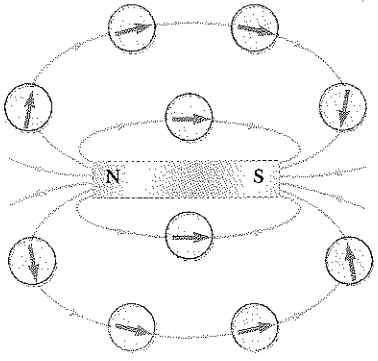


Bu buzdolabı, mıknatısları uç uca eklenen çok kısa çubuk mıknatıslara benzer. Eğer bir buzdolabı mıknatısının arkasını bir diğerinin arkasında çembersel bir yörünge çizecek biçimde kaydırırsanız iki kuzey ve güney kutub birbirlerini geçerken bir titreşim hissedebilirsiniz. (*George Semple*)

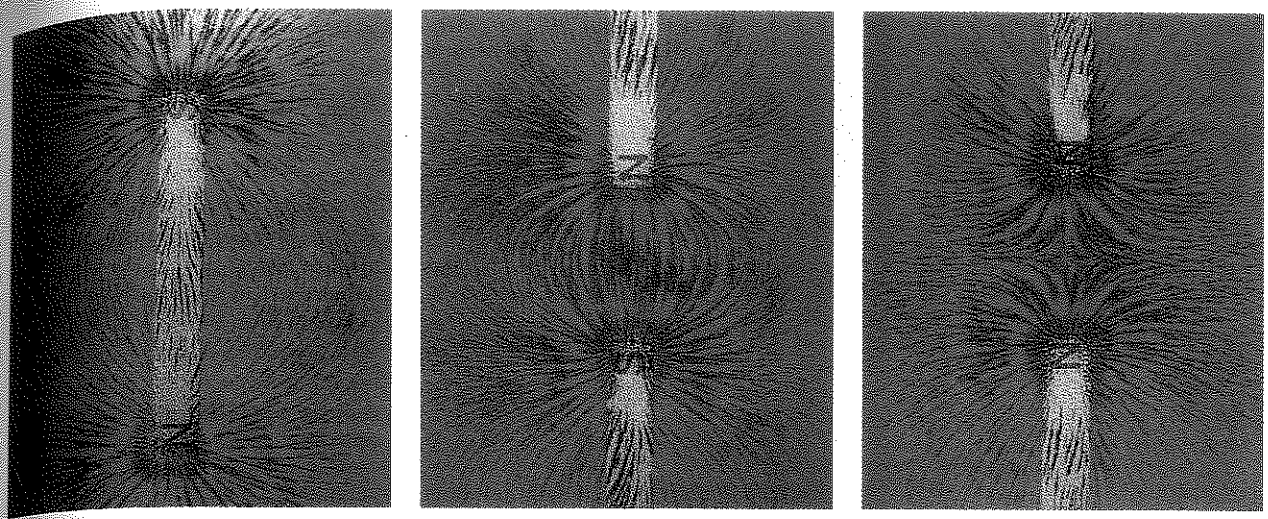
Tarihsel olarak, bir manyetik alanı temsil etmek için **B** harfi kullanılagelmiştir ve bu kitapta da kullandığımız gösterim budur. Herhangi bir yerdeki **B** manyetik alanının yönü oraya konan pusulanın gösterdiği yöndür. Şekil 29.1, bir çubuk mıknatısın manyetik alanının bir pusula yardımıyla nasıl izlenebildiğini göstermektedir. Mıknatısın dışındaki manyetik alan çizgilerinin kuzey kutbundan dışa doğru, güney kutbundan ise içe doğru yöneldiklerine dikkat ediniz. Şekil 29.2 de gösterildiği gibi, bir çubuk mıknatısın manyetik alan deseni, küçük demir tozları kullanılarak görünür hale getirilebilir.

Uzayın bir noktasındaki **B** manyetik alanını, orada bulunan bir deneme cismine alanın uyguladığı $\mathbf{F}_B$ manyetik kuvveti cinsinden tanımlayabiliriz. Deneme cismimiz **v** hızıyla hareket eden yüklü bir parçacık olarak alınabilir. Şimdilik, yükün bulunduğu bölgede hiçbir elektrik ya da yerçekim alanı bulunmadığını varsayalım. Bir manyetik alan içerisinde hareket eden çeşitli yüklü parçacıkların hareketleri ile ilgili deneyler aşağıdaki sonuçları verir:

- Parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü F_B, parçacığın v sürati ve q yükü ile orantılıdır.



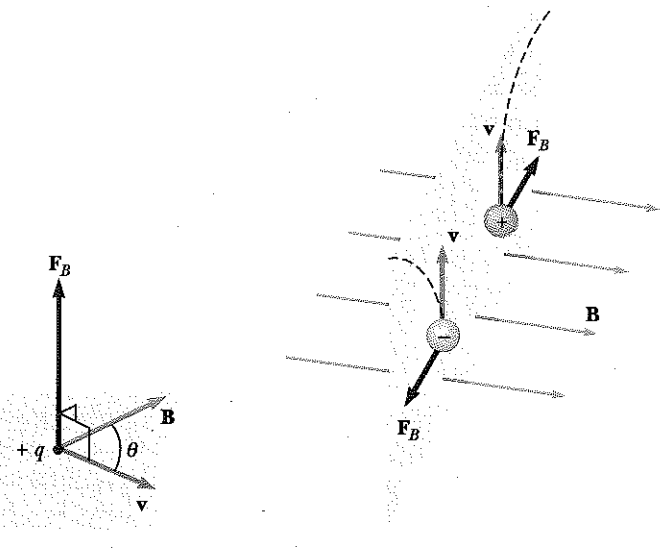
Şekil 29.1 Bir çubuk mıknatısın manyetik alan çizgilerini izleyebilmek için pusula iğneleri kullanılabilir.



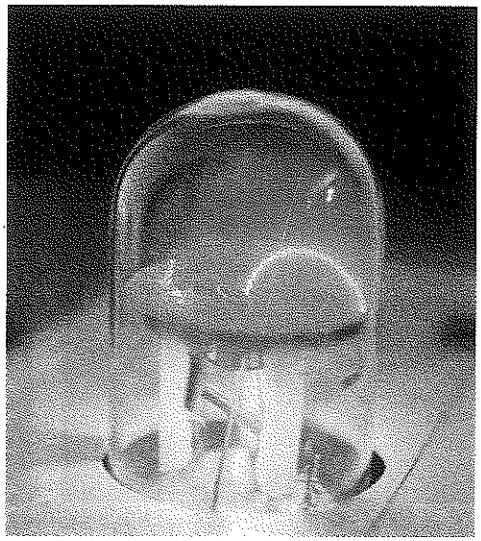
Şekil 29.2 (a) Bir çubuk mıknatısı çevreleyen manyetik alan deseninin (çizgilerinin) demir tozları ile görünür hale getirilmiş resmi. (b) İki çubuk mıknatısın *zıt* kutupları arasındaki manyetik alan deseni. (c) İki çubuk mıknatısın *aynı cins* kutupları arasındaki manyetik alan deseni (*Henry Leap ve Jim Lehman*)

Bir **B** manyetik alanında hareket eden yüklü bir parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin özellikleri.

- $\mathbf{F}_B$ Manyetik kuvvetinin büyüklüğü ve yönü, parçacığın hızına ve **B** manyetik alanının büyüklüğü ve yönüne bağlıdır.
- Yüklü bir parçacık manyetik alan vektörüne *paralel* yönde hareket ettiği zaman ona etkiyen manyetik kuvvet *sıfırdır*.
- Parçacığın hız vektörü manyetik alanla bir $\theta \neq 0$ açısı yaptığı zaman, manyetik kuvvet hem **v**, hem de **B** ye dik yönde etki eder. Yani $\mathbf{F}_B$, **v** ve **B** nin oluşturduğu düzleme diktir (Şekil 29.3a).



Şekil 29.3 Bir **B** manyetik alanı içerisinde **v** hızı ile hareket eden bir yüklü parçacığa etkiyen $\mathbf{F}_B$ manyetik kuvvetin yönü. (a) **v**, **B** ile bir θ açısı yaptığı zaman manyetik kuvvet, hem **v** ye ve hem de **B** ye diktir. (b) Bir manyetik alan içerisinde aynı hızla hareket eden iki zıt yüklü parçacığa zıt yönlü $\mathbf{F}_B$ manyetik kuvvetleri etkir.



Bu resimdeki mavi beyaz yay, bir manyetik alan içerisinde hareket eden elektron demetinin izlediği çember biçimli yolu göstermektedir. Kap oldukça alçak basınçta gaz içermektedir. Elektronlar, gaz atomlarına çarpınca atomların görünür bölgede ışık yaymalarına neden olurlar; böylece elektron demeti görünür hale gelir. Manyetik alan iki kangal ile oluşturulmuştur (gösterilmemiştir). Aygıt elektronun e/m oranını ölçmek amacıyla da kullanılabilir. (*CENCO nun izniyle*)

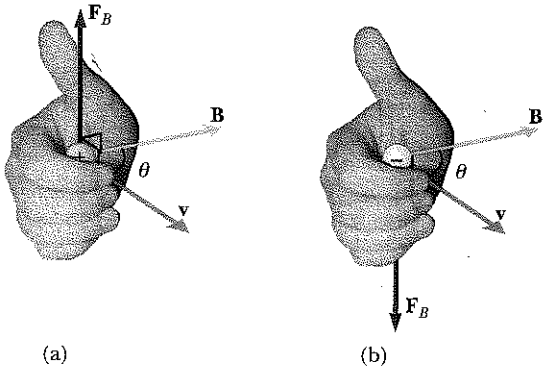
- Bir pozitif yüke etkiyen manyetik kuvvet, aynı yönde hareket eden bir negatif yüke etkiyen kuvvetin yönüne terstir. (Şekil 29.3 b).
- Eğer parçacığın hız vektörü **B** nin yönü ile bir θ açısı yaparsa, parçacığı etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü $\sin\theta$ ile orantılıdır.

Bu gözlemleri, manyetik kuvveti

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \qquad (29.1)$$

biçiminde yazarak özetleyebiliriz. Burada, q pozitif ise $\mathbf{F}_B$ nin yönü, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönündedir. Bu kuvvetin yönü, vektörel çarpımın tanımı gereği (Kesim 11.2 ye bak) hem **v**'ye hem de **B** ye diktir. Bu eşitliğe, uzayın bir noktasındaki manyetik alanın işlemsel bir tanımı gözüyle bakabiliriz. Yani, manyetik alan hareketli bir yüklü parçacığa etkiyen kuvvet cinsinden tanımlanabilir.

Şekil 29.4, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ vektör çarpımının yönünü bulmaya yarayan sağ-el kuralının kısa bir gösterimini vermektedir. Sağ elinizin dört parmağını avuç içi **B** ye bakacak şekilde **v** nin yönünde yöneltin ve sonra onları **B** ye doğru bükün. O zaman diğer parmaklara dik olarak açılan başparmak $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönünü göste-



Şekil 29.4 Bir **B** manyetik alanı içerisinde **v** hızı ile hareket eden q yüküne etkiyen manyetik kuvvet $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$'nin yönünü bulmaya yarayan sağ el kuralı. $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönü başparmağın işaret ettiği yöndedir. (a) Eğer q pozitif ise, $\mathbf{F}_B$ başparmağın yönünde, yani, yukarıdır. (b) q negatif ise, $\mathbf{F}_B$ aşağı yönde başparmağın işaret ettiği yönün tersinedir.

rir. $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ olduğundan, q pozitifse $\mathbf{F}_B$, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nin yönünde (Şek. 29.4a), q negatif ise, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ile ters yönlüdür (Şekil 29.4b).

Manyetik kuvvetin büyüklüğü

$$F_B = |q|vB \sin \theta \qquad \textbf{(29.2)}$$

Manyetik alan içerisinde hareket eden bir yüklü parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü.

bağıntısıyla verilir. Burada θ, $\mathbf{v}$ ile $\mathbf{B}$ nin arasındaki küçük açıdır. Bu eşitlikden, $\mathbf{v}$, $\mathbf{B}$ ye paralel ya da antiparalel olduğunda ($\theta = 0$ veya 180°) $\mathbf{F}$ 'nin *sıfır* olduğunu görürüz. Öte yandan, $\mathbf{v}$, $\mathbf{B}$ ye dik olduğunda ($\theta = 90°$) kuvvet, $F_{B,\,\text{maks}} = |q|vB$ ile verilen *maksimum* değerini alır.

Sınama Sorusu 29.1

Bir $\mathbf{B}$ manyetik alanı içerisinde $\mathbf{v}$ hızı ile hareket eden bir q yükü üzerinde manyetik kuvvetin yaptığı maksimum iş nedir?

Elektrik ve manyetik kuvvetler arasında birçok önemli farklar vardır:

Elektrik ve manyetik alanlar arasındaki farklar

- Elektrik kuvveti, her zaman elektrik alanına paralel, buna karşın manyetik kuvvet manyetik alana dik olarak etkir.
- Elektrik kuvveti, yüklü parçacığın hızından bağımsızdır. Halbuki, manyetik kuvvet yalnızca yüklü parçacık hareket halinde ise ona etki edebilir.
- Elektrik kuvveti yüklü bir parçacığın konumunu değiştirerek iş yapar, buna karşın kararlı bir manyetik alandan kaynaklanan manyetik kuvvet, parçacık yer değiştirdiğinde iş yapmaz.

Bu son ifadeden ve iş enerji teoreminden, yüklü bir parçacığın kinetik enerjisinin, yalnızca bir manyetik alanla değiştirilemeyeceği sonucuna ulaşırız. Başka bir deyişle,

Manyetik alan bir parçacığın hızının büyüklüğünü değiştiremez.

$\mathbf{v}$ hızı ile hareket eden bir yüke uygulanan manyetik alan onun hız vektörünün yönünü değiştirebilir fakat hızın büyüklüğünü veya kinetik enerjisini değiştiremez.

Eşitlik 29.2 den manyetik alanın SI biriminin coulomb-metre/saniye başına Newton olduğu görülür, ki buna **tesla** (T) denir:

$$1\ \text{T} = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}}$$

Saniye başına Coulomba bir amper dendiği için

$$1\ \text{T} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

dir.

Pratikte, manyetik alan birimi olarak cgs sisteminde **gauss** (G) da kullanılmaktadır. Gauss, teslaya $1\ \text{T} = 10^4\ \text{G}$ şeklinde bağlıdır. Manyetik alanların bazı tipik değerleri Çizelge 29.1 de verilmektedir.

Sınama Sorusu 29.2

Bir çubuk mıknatısın kuzey kutup ucu pozitif yüklü bir plastik parçasının yakınına tutuluyor. Mıknatıs plastiği çeker mi, iter mi yoksa etkilemez mi?

TABLO 29.1 Bazı Yaklaşık Manyetik Alan Büyüklükleri

Alan Kaynağı	Alan Büyüklüğü (T)
Kuvvetli süperiletken laboratuvar mıknatısı	30
Kuvvetli sıradan laboratuvar mıknatısı	2
Tıpta kullanılan MRI birimi	1,5
Çubuk mıknatıs	10^{-2}
Güneşin yüzeyi	10^{-2}
Dünyanın yüzeyi	$0{,}5 \times 10^{-4}$
İnsan beyninin içi (sinir atımlarından kaynaklanan)	10^{-13}

ÖRNEK 29.1 Manyetik Alanda Hareket Eden Bir Elektron

Bir televizyonun resim tüpündeki bir elektron x ekseni boyunca $8{,}0 \times 10^6$ m/s lik bir süratle tüpün önüne (ekran) doğru ilerliyor (Şekil 29.5). Tüpün boynuna sarılan telden yapılmış kangallar 0,025 T büyüklüğünde bir alan oluştururlar. Bu alan xy düzleminde olup x-ekseni arasındaki açı 60° dir. Elektrona etkiyen manyetik kuvveti ve elektronun ivmesini bulunuz.

Çözüm 29.2 Eşitliğini kullanarak manyetik kuvvetin büyüklüğünü bulabiliriz:

$$F_B = |q|vB \sin\theta$$

$$= (1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C})(8{,}0 \times 10^6 \text{m/s})(0{,}025\ \text{T})(\sin 60°)$$

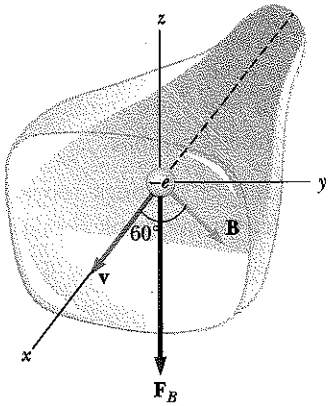
$$= 2{,}8 \times 10^{-14}\ \text{N}$$

$\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ pozitif z yönünde (sağ el kuralına göre) ve yük negatif olduğundan, $\mathbf{F}_B$ negatif z yönündedir.

Elektronun kütlesi $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg dır, bu nedenle ivmesi,

$$a = \frac{F_B}{m_e} = \frac{2{,}8 \times 10^{-14}\ \text{N}}{9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg}} = 3{,}1 \times 10^{16}\ \text{m/s}^2$$

olup negatif z yönündedir.

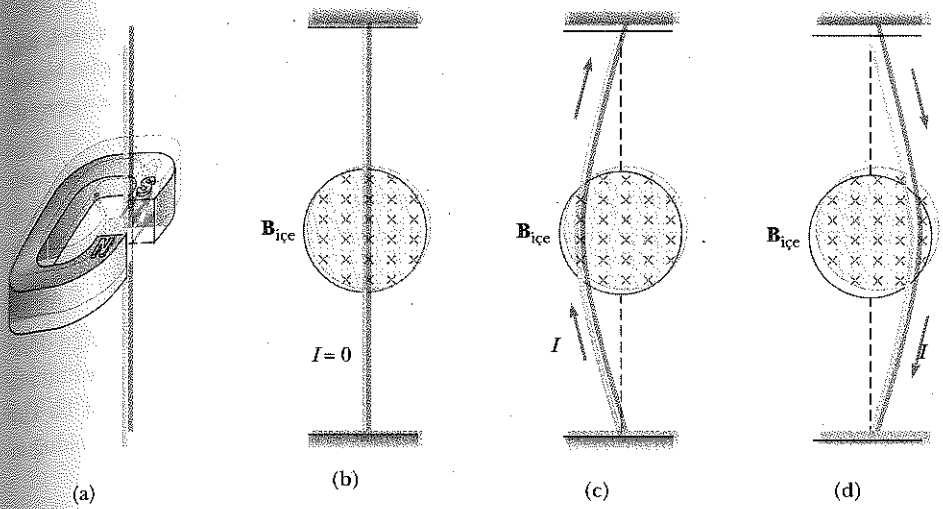


Şekil 29.5 **v** ve **B** xy düzleminde olduğunda elektrona etkiyen $\mathbf{F}_B$ manyetik kuvveti negatif z yönündedir.

29.2 AKIM TAŞIYAN BİR İLETKENE ETKİYEN MANYETİK KUVVET

12.3 Tek bir yüklü parçacık, bir manyetik alan içinden geçerken bir kuvvet etkisinde kalıyorsa, üzerinden akım geçen bir tele de manyetik alan içinde kuvvet etkimesi sizce süpriz olmamalıdır. Bu, akımın çok sayıda yüklü parçacıktan oluşmasının bir sonucudur; bu yüzden, tele etkiyen net kuvvet, akımı oluşturan tüm yüklü parçacıklara etkiyen bireysel kuvvetlerin vektörel toplamıdır. Parçacıklara etkiyen kuvvet, parçacıklar teli oluşturan atomlara çarptıkları zaman tele iletilmiş olur.

Tartışmalarımıza devam etmeden önce, bu kitapta kullanılan notasyonların bir açıklamasını vermenin zamanı geldi. Şekillerde **B** nin yönünü belirtmek için, bazen, Şekil 29.5, Şekil 29.6 ve 29.7 de olduğu gibi perspektif görünümler kullanırız. Düz şekillerde, Örneğin Şekil 29.6b'den d'ye kadar olanlar



Şekil 29.6 (a) Bir mıknatısın kutupları arasına düşey olarak asılmış bir tel (b) Mıknatısın kuzey kutbundan güney kutbuna doğru bakıldığında (a) şıkkındaki kurgunun görünüşü olup manyetik alanın (mavi çarpı işaretli) sayfa düzleminin içine doğru olduğunu gösterir. Telde akım yukarı olduğunda, tel sola doğru sapar. (d) Akım aşağı yönde olduğunda ise tel sağa doğru sapar.

gibi, kağıt düzleminin içine doğru yönelmiş bir manyetik alanı mavi çarpı işaretiyle gösteririz. Çarpı işareti sizden öteye doğru dik olarak atılan bir okun kuyruğunu temsil eder. Bu durumda, alanı $\mathbf{B}_{\text{içe}}$ ile gösteririz. Buradaki "in" veya "içe" alt indisi, alanın "sayfanın içine" doğru olduğunu belirtir. Eğer **B** dik ve sayfa düzleminden dışa doğru yönelmiş ise, bir sıra mavi noktalarla temsil ederiz (Şekil P29.56 ya bakınız). Bu durumda alana $\mathbf{B}_{\text{dışa}}$ deriz. **B** sayfa düzleminde ise, Şekil 29.7 de gösterildiği gibi, okuçları bulunan bir grup mavi alan çizgisi kullanırız.

Akım taşıyan bir iletkene etkiyen kuvvet, Şekil 29.6a da olduğu gibi bir mıknatısın kutupları arasına bir tel asarak gösterilebilir. Görüş kolaylığı açısından Şekil 29.6 nın (b), (c) ve (d) kısımlarında güney kutup ucunun yüzünü gösterebilmek için (a) daki at nalı mıknatıs kaldırılmıştır. Manyetik alan sayfanın içine doğru olup gölgeli dairenin içini kaplamaktadır. Teldeki akım sıfır olduğunda, Şekil 29.6b de olduğu gibi, tel düşey durumda kalır. Ancak, Şekil 29.6c de olduğu gibi, telde yukarı yönde bir akım oluşturulduğunda tel sola sapar. Şekil 29.6d de olduğu gibi akımın yönü ters çevirilirse tel sağa sapar.

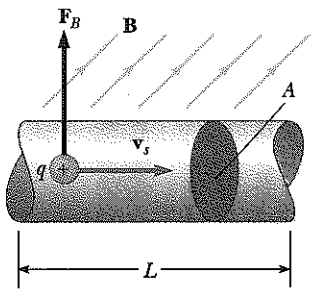
Bu tartışmayı, Şekil 29.7 deki gibi düzgün bir **B** *dış* manyetik alanı içinde I kadar akım taşıyan, kesit alanı A ve uzunluğu L olan düz bir tel parçası düşünerek nicel hale getirelim. Bir $\mathbf{v}_s$ sürüklenme hızı ile hareket eden q yüküne etkiyen manyetik kuvvet $q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ bağıntısıyla verilir. Tele etkiyen toplam kuvveti bulmak için, bir yüke etkiyen $q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ kuvveti, tel parçasında bulunan yük sayısı ile çarpılır. Parçanın hacmi AL olduğu için içindeki yük sayısı nAL dir. Burada n birim hacimdeki yük sayısıdır. Sonuç olarak uzunluğu L olan tele etkiyen toplam manyetik kuvvet

$$\mathbf{F}_B = (q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B})\,nAL$$

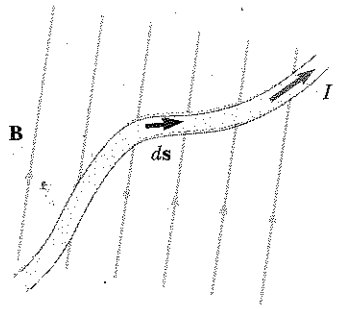
dir. Bu bağıntı, 27.4 Eşitliğine göre teldeki akımın $I = nqv_sA$ olduğuna dikkat ederek daha kullanışlı bir biçimde yazılabilir. Bu nedenle,

$$\mathbf{F}_B = I\mathbf{L} \times \mathbf{B} \qquad (29.3)$$

Düzgün bir manyetik alandaki doğrusal bir tel parçasına etkiyen kuvvet



Şekil 29.7 Bir **B** manyetik alanı içerisine yerleştirilmiş bir akım–taşıyan tel parçası. Alanı oluşturan herbir yüke etkiyen manyetik kuvvet, $q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ olup L uzunluğundaki parçaya etkiyen net kuvvet $I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ dir



Şekil 29.8 Bir **B** dış manyetik alanı içerisinde I akımı taşıyan keyfi biçimli bir tel manyetik kuvvet etkisindedir. Herhangi bir $d\mathbf{s}$ parçasına etkiyen kuvvet, $I\,d\mathbf{s} \times \mathbf{B}$ ile verilir ve sayfadan dışa doğru yönelmiştir. Bu kuvvetin yönünü sağ-el kuralını uygulayarak doğrulayabilmelisiniz.

biçimde ifade edilebilir. Burada **L**, I akımının yönünde bir vektördür. **L** nin büyüklüğü parçanın uzunluğuna yani L ye eşittir. Bu ifadenin, düzgün bir dış manyetik alan içerisinde bulunan yalnızca doğrusal bir tel parçası için geçerli olduğuna dikkat edelim.

Şimdi, Şekil 29.8 deki gibi bir dış manyetik alan içerisinde düzgün kesitli fakat keyfi biçimli bir tel gözönüne alalım. Bir **B** alanı bulunduğu zaman çok küçük bir $d\mathbf{s}$ parçasına etkiyen manyetik kuvvet Eşitlik 29.3 gereği

$$d\mathbf{F}_B = I\,d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \tag{29.4}$$

bağıntısıyla verilir. Burada $d\mathbf{F}_B$, Şekil 29.8 de varsayılan yönler için kağıt düzelemine dik ve dışa doğru yönelmiştir. Eşitlik 29.4 **B** nin değişik bir tanımı olarak düşünebilir. Yani, **B** alanı, bir akım elamanına etkiyen ölçülebilir bir kuvvet cinsinden tanımlanabilir. Buradaki kuvvet, **B** akım elemanına dik olduğunda maksimum, **B** akım elemanına paralel olduğunda ise sıfırdır.

Şekil 29.8 de gösterilen tele etkiyen toplam $\mathbf{F}_B$ kuvvetini elde etmek için, Eşitlik 29.4'ü telin uzunluğu boyunca integre ederiz:

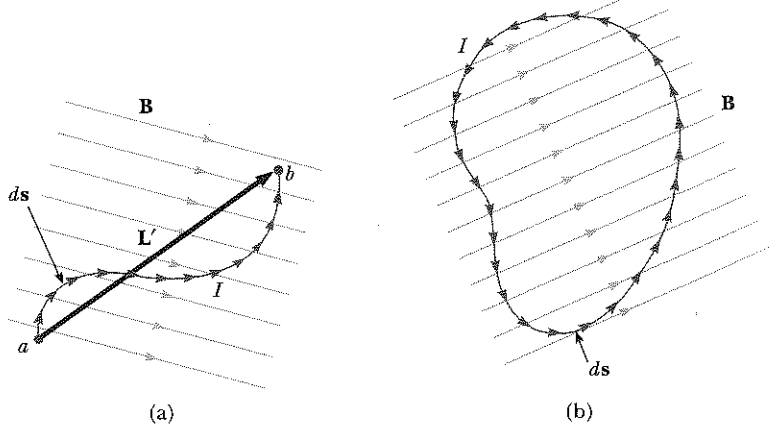
$$\mathbf{F}_B = I\int_a^b d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \tag{29.5}$$

Bu ifadede, a ve b telin uç noktalarını temsil etmektedir. Bu integral alınırken her noktada manyetik alanın büyüklüğü ve $d\mathbf{s}$ vektörüne göre yönü (yani akım elemanına göre yönelimi) değişebilir.

Şimdi 29.5 Eşitliğinin uygulanmasını içeren iki özel durumu ele alalım. Her iki durumda da dış manyetik alanın büyüklüğü ve yönü sabit kabul edilmektedir.

Durum 1 Şekil 29.9a daki gibi düzgün bir **B** dış manyetik alanı içerisinde bulunan, I akımı taşıyan eğrisel bir tel gözönüne alalım. Alan düzgün (yani, **B** iletkenin bulunduğu bölgenin tamamında aynı değere sahip) varsayıldığı için, 29.5 Eşitliğinde **B**, integralin dışına alınabilir ve

$$\mathbf{F}_B = I\left(\int_a^b d\mathbf{s}\right) \times \mathbf{B} \tag{29.6}$$



Şekil 29.9 (a) Düzgün bir manyetik alan içinde I akımı taşıyan eğri bir iletken. İletkene etkiyen manyetik kuvvet, telin a ve b uçlarını birleştiren L' uzunluklu düz parçaya etkiyen kuvvete eşdeğerdir. (b) Düzgün bir manyetik alan içinde akım-taşıyan keyfi biçimli bir ilmek. İlmeğe etkiyen net kuvvet sıfırdır.

elde ederiz. Fakat $\int_a^b d\mathbf{s}$, niceliği a dan b ye kadar olan tüm yerdeğişim elemanlarının *vektörel toplamını* temsil eder. Birçok vektörün toplanması ile ilgili kural gereği toplam, a dan b ye doğru yönelen $\mathbf{L}'$ vektörüne eşittir. Bu nedenle, Eşitlik 29.6

$$\mathbf{F}_B = I\mathbf{L}' \times \mathbf{B} \qquad (29.7)$$

biçimine indirgenir.

Durum 2 I akımı taşıyan keyfi biçimli kapalı bir ilmek, Şekil 29.9b deki gibi düzgün bir $\mathbf{B}$ manyetik alanına yerleştirilmiş olsun. İlmeğe etkiyen kuvveti yine Eşitlik 29.6 biçiminde ifade edebiliriz. Fakat bu sefer uzunluk elemanları $d\mathbf{s}$ lerin vektörel toplamı kapalı ilmeğin tamamı boyunca yapılmalıdır:

$$\mathbf{F}_B = I\left(\oint d\mathbf{s}\right) \times \mathbf{B}$$

uzunluk elemanı vektörlerinin toplamı kapalı bir ilmek oluşturduğu için vektörel toplam *sıfır* olmalıdır. Bu sonuç, çokgen yöntemini kullanarak vektörlerin grafiksel süreçle toplanmasına dayanır. $\oint d\mathbf{s} = 0$ olduğundan, $\mathbf{F}_B = 0$ sonucuna ulaşırız. Yani,

Düzgün bir manyetik alan içerisindeki herhangi bir kapalı akım ilmeğine etkiyen net manyetik kuvvet sıfırdır.

ÖRNEK 29.2 Yarım-Çember Şeklindeki Bir İletkene Etkiyen Kuvvet

Yarıçapı R olan yarım çember biçiminde bükülmüş bir tel, kapalı bir devre oluşturuyor. Tel, I akımı taşımaktadır. Devre, Şekil 29.10 daki gibi xy düzleminde olup pozitif y yönündeki düzgün bir manyetik alanda bulunmaktadır. Telin doğru ve eğri parçalarına etkiyen manyetik kuvvetlerin büyüklük ve yönlerini bulunuz.

Çözüm Telin düz parçasına etkiyen kuvvetin büyüklüğü $F_1 = ILB = 2IRB$ dir. Çünkü $L = 2R$ ve bu parça $\mathbf{B}$ ye diktir. $\mathbf{F}_1$ in yönü kağıt düzlemine dik ve dışa doğrudur. Çünkü $\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ pozitif z ekseni yönündedir. (Yani, $\mathbf{L}$ akımla aynı yönde sağa yönelmiş olduğundan vektörel çarpım kuralı gereği, $\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ dışa doğrudur.

Eğrisel parçaya etkiyen $\mathbf{F}_2$ kuvvetini bulmak için önce Şekil 29.10 da gösterilen, $d\mathbf{s}$ uzunluk elemanına etkiyen $d\mathbf{F}_2$ kuvvetini veren bir ifade yazmalıyız. $d\mathbf{s}$ ile $\mathbf{B}$ arasındaki açı θ ise $d\mathbf{F}_2$ nin büyüklüğü

$$dF_2 = I\,|d\mathbf{s} \times \mathbf{B}| = IB \sin\theta\, ds$$

ile verilir. Bu ifadenin integralini almak için, ds yi θ değişkeni cinsinden yazmalıyız. $s = R\theta$, $ds = Rd\theta$ olduğundan dF_2 ifadesi

$$dF_2 = IBR \sin\theta\, d\theta$$

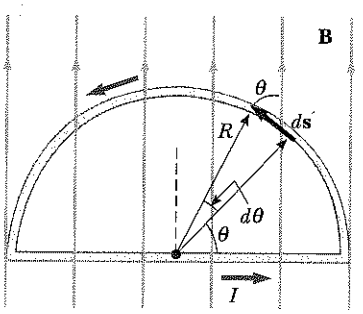
biçiminde yazılabilir. Eğri parçaya etkiyen *toplam* F_2 kuvvetini bulmak için, *tüm* elemanlardan gelecek katkıların toplanması gerekir. Bu da üstteki ifadeyi integre ederek sağlanır. Her elemana etkiyen kuvvetin yönü aynıdır: kağıt düzleminin *içine* doğru (çünkü $d\mathbf{s} \times \mathbf{B}$ içe doğrudur). Bu nedenle, eğri tel üzerindeki toplam kuvvet $\mathbf{F}_2$ de kağıt düzleminin *içine* doğru olmalıdır. $\theta = 0$ ile $\theta = \pi$ sınırları arasında (yani, yarım çemberin tamamı) dF_2 nin integrali,

$$F_2 = IRB\int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta = IRB\Big[-\cos\theta\Big]_0^{\pi}$$

$$= -IRB\,(\cos\pi - \cos 0) = -IRB(-1 - 1) = 2IRB$$

olur.

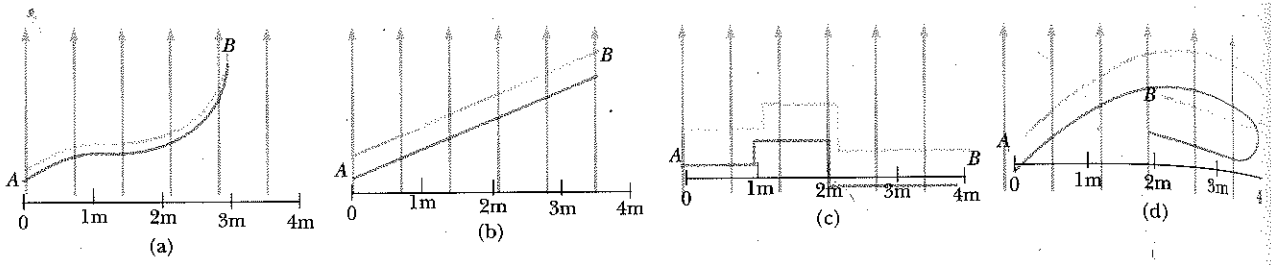
Düz tele etkiyen kuvvet $F_1 = 2IRB$, kağıt düzleminden dışa doğru iken $F_2 = 2IRB$ kağıt düzleminin içine doğru olduğundan, kapalı ilmeğe etkiyen net kuvvetin sıfır olduğunu görürüz. Bu sonuç, yukarıda açıklanan Durum 2 ile uyumludur.



Şekil 29.10 Düzgün bir manyetik alanın içinde bulunan kapalı bir akım ilmeğine etkiyen net kuvvet *sıfırdır*. Üstteki şekilde, düz parçaya etkiyen kuvvet $2IRB$ olup dışa doğru; öte yandan eğri parçaya etkiyen kuvvet ise yine $2IRB$ fakat içe doğrudur.

Sınama Sorusu 29.3

Şekil 29.11 de gösterilen tellerin dördü de aynı manyetik alanın içinde A noktasından B noktasına aynı akımı taşımaktadır. Tellerin hissettikleri kuvvetleri büyükten küçüğe doğru sıralayın.



Şekil 29.11 En büyük manyetik kuvveti hangi tel hisseder?

29.3 DÜZGÜN BİR MANYETİK ALAN İÇERİSİNDEKİ BİR AKIM İLMEĞİNE ETKİYEN TORK

Önceki kesimde, akım-taşıyan bir iletken bir dış manyetik alan içine yerleştirildiğinde ona etkiyen kuvveti bulduk. Bunu bir hareket noktası olarak alıp, bir manyetik alan içerisine yerleştirilen bir akım ilmeğine bir tork etkidiğini göstereceğiz. Bu sonuçlar Bölüm 31 de motorları tartışırken, pratik açıdan son derece değerli olacaktır.

Şekil 29.12a da olduğu gibi düzlemine paralel düzgün bir manyetik alan içinde bulunan ve I akımı taşıyan dikdörtgen bir ilmek alalım. ① ve ③ nolu kenarlara hiçbir kuvvet etkimez, çünkü bu kenarlar alana paralel ve bu nedenle bu kenarlar için $\mathbf{L} \times \mathbf{B} = 0$ dır. Öte yandan ② ve ④ nolu kenarlara manyetik kuvvetler etkir, çünkü bu kenarlar alana diktir. Bu kuvvetlerin büyükleri, 29.3 Eşitliği gereğince,

$$F_2 = F_4 = IaB$$

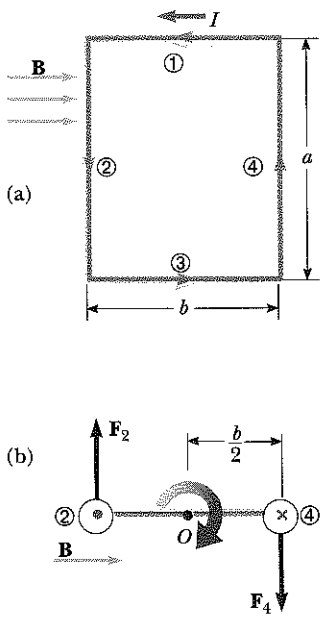
ile verilir. Şekil 29.12a daki bakışa göre ② teline etkiyen $\mathbf{F}_2$ kuvvetinin yönü sayfa düzleminden dışa, ④ teline etkiyen $\mathbf{F}_4$ kuvvetinin yönü ise sayfa düzleminin içine doğrudur. Eğer ilmeğe ③ nolu kenar tarafından yatay olarak ② ve ④ nolu kenarlar boyunca bakarsak Şekil 29.12b deki manzarayı görürüz ve $\mathbf{F}_2$ ve $\mathbf{F}_4$ kuvvetleri gösterildiği gibi yönelmişlerdir. Bu iki kuvvetin zıt yönlü olduklarına fakat etki çizgilerinin farklı olduğuna dikkat ediniz. İlmek O noktası etrafında dönebilecek şekilde bir mil geçirilirse, bu iki kuvvet O ya göre bir tork oluştururlar ve söz konusu tork, ilmeği saat yönünde döndürür. Bu torkun büyüklüğü τ_{mak},

$$\tau_{\text{maks}} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (IaB) \frac{b}{2} + (IaB) \frac{b}{2} = IabB$$

dir. Burada, O ya göre moment kolu her iki kuvvet için de, $b/2$ dir. İlmeğin içindeki alan $A = ab$ olduğundan maksimum tork,

$$\tau_{\text{maks}} = IAB \qquad (29.8)$$

biçiminde ifade edilebilir. Bu sonucun, $\mathbf{B}$ alanı, ilmeğin düzlemine yalnız paralel olduğu zaman, geçerli olduğunu unutmayınız. Şekil 29.12b de gösterildiği gibi, ③ nolu kenardan yatay olarak bakıldığı zaman dönme yönü saat yö-



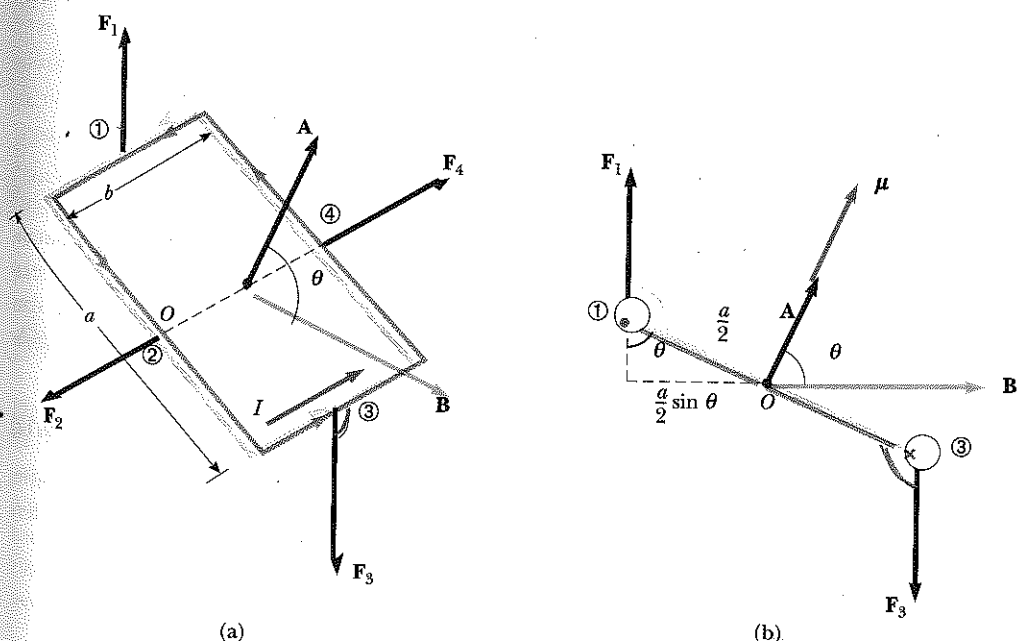
Şekil 29.12 (a) Düzgün bir manyetik alan içerisindeki dikdörtgen biçimli bir akım ilmeğinin üsten görünüşü. ① ve ③ nolu kenarlar **B**'ye paralel olduklarından hiçbir kuvvet etkisini hissetmezler. Ancak ② ve ④ kenarlarına kuvvetler etkir. (b) İlmeğin ② ve ④ kenarları boyuncaki yandan görünüşü, bu kenarlara etkiyen $\mathbf{F}_2$ ve $\mathbf{F}_4$ kuvvetlerinin ilmeği saat yönünde döndürmeye çalışan bir tork oluşturduklarını gösterir. Sol çemberin içindeki mor nokta ② telindeki akımın size doğru, sağdaki çemberin içindeki mor çarpının ise ④ telindeki akımın sizden içe doğru aktığını gösterir.

nündedir. Akım ters yönde olsaydı, kuvvetlerin yönleri ters olacak ve dolayısıyla dönme eğilimi de saat yönünün tersi olacaktı.

Şimdi, düzgün manyetik alanın, Şekil 29.13a da olduğu gibi, ilmek düzlemine dik bir doğruyla $\theta < 90°$ açısı yaptığını varsayınız. Kolaylık açısından, **B** nin, ① ve ③ kenarlarına dik olduğunu varsayacağız. Bu durumda, ② ve ④ kenarlarına etkiyen $\mathbf{F}_2$ ve $\mathbf{F}_4$ kuvvetleri birbirlerini yok ederler ve tork oluşturmazlar. Çünkü ortak bir başlangıç noktasından geçerler. Öte yandan, ① ve ③ kenarlarına etkiyen $\mathbf{F}_1$ ve $\mathbf{F}_3$ kuvvetleri bir çift oluştururlar. Bu nedenle *herhangi bir noktaya göre* torkları vardır. Şekil 29.13b de gösterilen uçtan görünüşe bakılırsa O noktasına göre $\mathbf{F}_1$ in moment kolunun $(a/2)\sin\theta$ olduğu görülür. Benzer şekilde Oya göre $\mathbf{F}_3$ nin moment kolu da $(a/2)\sin\theta$ dir. $F_1 = F_3 = IbB$ olduğundan Oya göre net torkun

$$\begin{aligned}\tau &= F_1 \frac{a}{2}\sin\theta + F_3 \frac{a}{2}\sin\theta \\ &= IbB\left(\frac{a}{2}\sin\theta\right) + IbB\left(\frac{a}{2}\sin\theta\right) = IabB\sin\theta \\ &= IAB\sin\theta\end{aligned}$$

ile verilen bir büyüklüğe sahip olduğu görülür. Burada $A = ab$ ilmeğin alanıdır. Bu sonuç, torkun, manyetik alan, Şekil 29.12 yi tartışırken gördüğümüz gibi ilmek düzlemine paralel $(\theta = 90°)$ olduğu zaman IAB ile verilen maksimum değere ulaştığını ve dik olduğu zaman $(\theta = 0)$ ise sıfır değerini aldığını gösterir. Şekil 29.13 te gördüğümüz gibi ilmek θ nın daha küçük değerlerine doğru dönmeye çalışır (başka bir deyişle, ilmek düzleminin normali olan **A** vektörü, manyetik alanın yönüne doğru döner).



Şekil 29.13 (a) Düzgün bir manyetik alan içerisindeki dikdörtgensel bir akım ilmeği. İlmeğin düzlemine dik olan alan vektörü **A**, manyetik alanla bir θ açısı yapmaktadır. ② ve ④ kenarlarına etkiyen manyetik kuvvetler birbirlerini götürürler, fakat ① ve ③ kenarlarına etkiyen kuvvetler ilmekte bir tork oluştururlar. (b) ① ve ③ kenarları boyunca bakıldığında ilmeğin kenardan görünüşü.

Sınama Sorusu 29.4

Şekil 29.13 de, manyetik alan gösterildiği yönde yönelmiş fakat büyüklüğü soldan sağa doğru gittikçe artıyorsa, dikdörtgensel akım ilmeğine etkiyen kuvvetleri betimleyiniz.

Bir akım ilmeği üzerindeki tork

Düzgün bir **B** manyetik alanı içerisine yerleştirilen bir akım ilmeğine etkiyen tork için kullanışlı bir tanım,

$$\boldsymbol{\tau} = I\mathbf{A} \times \mathbf{B} \tag{29.9}$$

Burada **A**, Şekil 29.13 de gösterildiği gibi ilmek düzlemine dik bir vektör olup, büyüklüğü ilmeğin çevrelediği alana eşittir. **A** nın yönü Şekil 29.14 te açıklandığı gibi sağ-el kuralı ile saptanır. Sağ elin dört parmağı ilmekteki akım yönünde kıvrıldığı zaman, açılan baş parmak **A** nın yönünü gösterir. $I\mathbf{A}$ çarpımı ilmeğin **manyetik dipol momenti** $\boldsymbol{\mu}$ olarak tanımlanır. Bir başka deyişle

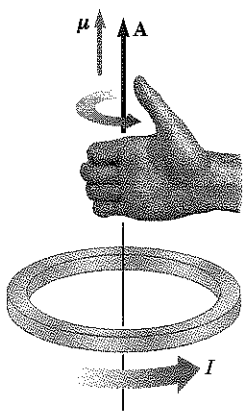
Akım ilmeğinin manyetik dipol momenti

$$\boldsymbol{\mu} = I\mathbf{A} \tag{29.10}$$

dır. Manyetik momentin SI sisteminde birimi amper-metre^2 (A·m^2) dir. Bu tanımı kullanarak, bir **B** manyetik alanı içerisindeki akım taşıyan bir ilmeğe etkiyen torku,

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \tag{29.11}$$

biçiminde tanımlayabiliriz. Bu sonucun ortamda bir **E** elektrik alanı bulunduğu zaman bir elektrik dipol momente (**p** ye) etkiyen torka ($\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$) benzerliğine dikkat ediniz (Eşitlik 26.18).



Şekil 29.14 **A** vektörünün yönünü saptamaya yarayan sağ-el kuralı. $\boldsymbol{\mu}$ manyetik momenti de **A** nın yönündedir.

Yukarıda tork, ilmeğe göre **B** nin belirli bir yönelimi için bulunmuş olmasına rağmen, $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}$ eşitliği herhangi bir yönelim için de geçerlidir. Ayrıca, tork ifadesi dikdörtgen biçimli bir ilmek için elde edilmiş olmakla birlikte, sonuç ilmeğin şekli ne olursa olsun geçerlidir.

Eğer bir kangal (bobin), herbiri aynı akımı taşıyan ve aynı alanı çevreleyen N sarımdan oluşmuşsa, kangalın toplam manyetik dipol momenti, bir sarımlı manyetik dipol momentinin N katıdır. N-sarımlı kangala etkiyen tork, bir-sarımlı kangala etkiyenin N katıdır. Bu nedenle, $\boldsymbol{\tau} = N\boldsymbol{\mu}_{\text{ilmek}} \times \mathbf{B} = \boldsymbol{\mu}_{\text{bobin}} \times \mathbf{B}$ biçiminde yazabiliriz.

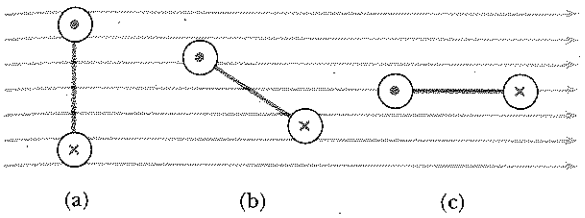
Kesim 26.6 da bir elektrik alan içerisindeki bir elektrik dipolünün potansiyel enerjisinin $U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$ ile verildiğini bulmuştuk. Bu enerji dipolün elektrik alan içerisindeki yönelimine bağlıdır. Benzer şekilde, bir manyetik alan içerisindeki bir manyetik dipolün potansiyel enerjisi de dipolün manyetik alan içerisindeki yönelimine bağlı olup,

$$U = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \tag{29.12}$$

ile verilir. Bu ifadeden, $\boldsymbol{\mu}$, **B** ile aynı yöne yöneldiğinde en düşük enerjisine, yani $U_{\text{min}} = -\mu B$ ye sahip olacağını görürüz. Öteyandan $\boldsymbol{\mu}$'nün yönü **B**'ye ters yönde olduğunda dipol en yüksek enerjisine, $U_{\text{maks}} = +\mu B$, sahip olur.

Sınama Sorusu 29.5

Şekil 29.15 de gösterilen dikdörtgensel ilmeklere etkiyen torkların büyüklüklerini, büyükten küçüğe doğru sıralayınız. Tüm ilmekler özdeş ve aynı akımı taşımaktalar.



Şekil 29.15 En büyük torku hangi akım ilemği (kenardan görünüş) hisseder?

ÖRNEK 29.3 Bir Kangalın Manyetik Dipol Momenti

Boyutları 5,40 cm × 8,50 cm olan dikdörtgensel bir kangal (bobin), 25 sarımlı bir telden oluşmakta ve 15 mA lik bir akım taşımaktadır. (a) Kangalın manyetik momentinin büyüklüğünü hesaplayınız.

Çözüm Kangalın 25 sarımı olduğuna ve her sarımın yüzey alanı A aynı varsayılabildiğine göre, Eşitlik 29.10 da değişiklik yaparak

$$\mu_{\text{kangal}} = NIA = (25)\ (15 \times 10^{-3}\ \text{A})\ (0{,}054\ \text{m} \times 0{,}085\ \text{m})$$
$$= 1{,}72 \times 10^{-3}\ \text{A}\cdot\text{m}^2$$

(b) İlmek düzlemine paralel olarak, büyüklüğü 0,350 T olan bir manyetik alan uygulanırsa etki eden torkun büyüklüğü nedir?

Çözüm B, μ_{kangal} ye dik olduğundan, Eşitlik 29.11,

$$\tau = \mu_{\text{kangal}} B = (1{,}72 \times 10^{-3}\ \text{A}\cdot\text{m}^2)\ (0{,}350\ \text{T})$$
$$= 6{,}02 \times 10^{-4}\ \text{N}\cdot\text{m}$$

Alıştırma $\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{T}$ birimlerinin N·m ile verilen tork birimine indirgendiğini kanıtlayınız.

Alıştırma μ ile manyetik alan arasındaki açı (a) 60° ve (b) 0° olduğu zaman kangala etkiyen torkun büyüklüğünü hesaplayınız.

Cevap (a) $5{,}21 \times 10^{-4}$ N·m (b) sıfır

Web

Tork oluşturucularla ilgili daha fazla bilgi edinmek için bu konuda NASA'ya aygıt üreten bazı firmaların Web Site'lerine girin: http://www.smad.com veya http://www.itaco.com

ÖRNEK 29.4 Uydu Davranış Kontrolü

Birçok uydunun yönelimlerini ayarlamak için *tork-oluşturucu* "*torquers*" denen kangallar kullanılır. Bu aygıtlar, Dünya'nın manyetik alanı ile etkileşerek uzay aracı üzerinde x, y veya z yönünde bir tork oluştururlar. Bu tip bir davranış kontrol sisteminin en büyük avantajı, güneşin oluşturduğu elektriği kullanması ve bu nedenle hiçbir itici yakıt tüketmemesidir.

Eğer tipik bir aygıtın manyetik dipol momenti 250 $\text{A}\cdot\text{m}^2$ ise, Dünya'nın manyetik alanının $3{,}0 \times 10^{-5}$ T olduğu bir yükseklikte uydunun tork-oluşturucusu çalıştığı zaman o uyduya uygulanan maksimum tork ne olur?

Çözüm Maksimum torkun, Dünya'nın manyetik alanı tork-oluşturucunun manyetik dipol momentine dik olduğu zaman oluştuğunu anımsayarak yine 29.11 Eşitliğini uygulayabiliriz:

$$\tau_{\text{maks}} = \mu B = (250\ \text{A}\cdot\text{m}^2)\,(3{,}0 \times 10^{-5}\ \text{T})$$
$$= 7{,}5 \times 10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{m}$$

Alıştırma Bir tork-oluşturucu, 28 V'luk bir potansiyel farkında 1,3 W'lık bir güce gereksinim duyduğuna göre, çalıştığında ne kadar akım çeker?

Cevap 46 mA

ÖRNEK 29.5 D'Arsonval Galvanometresi

Bir D'Arsonval Galvanometresi'nin (Kes. 28.5'e bak) kesitten görünümü Şekil 29.16 da gösterilmektedir. Kangalı oluşturan tel sargıdan bir akım geçtiği zaman, mıknatısın oluşturduğu manyetik alan, kangala bir tork etki ettirir. Bu tork kangalı kendisine tutturulan göstergesiyle birlikte yaya karşı döndürür. Göstergenin sapma açısının kangaldaki akımla doğru orantılı olduğunu gösterelim.

Çözüm Manyetik alanın kangala uyguladığı τ_m torku bulmak için 29.11 Eşitliğini kullanabiliriz. Kangaldan geçen manyetik alanın kangal düzleminin normaline dik olduğunu varsayarsak, 29.11 Eşitliği

$$\tau_m = \mu B$$

olur. (Bu mantıklı bir varsayımdır, çünkü mıknatısın dairesel kesidi manyetik alan çizgilerinin yarıçapsal (radyal) olduğunu gösterir). Kangalın oluşturduğu tork, bu torka karşı koyar. Kangalın torku, Hooke yasasının dönmeyle ilgili şekli olup, $\tau_s = -\kappa\varphi$ dir. Burada κ yayın burulma sabiti ve φ dönme açısıdır. Gösterge durgun haldeyken kangalın açısal ivmesi olmadığından bu torkların toplamı sıfır olmalıdır:

$$(1) \qquad \tau_m + \tau_s = \mu B - \kappa\varphi = 0$$

29.10 Eşitliği, telin N sarımının manyetik dipol momentini sarımlardan geçen akıma bağlamamızı sağlar:

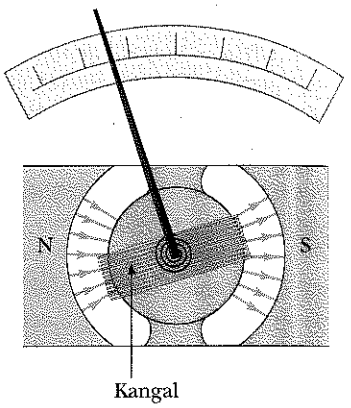
$$\mu = NIA$$

μ nün bu ifadesini Eşitlik (1) de yerine koyarak;

$$(NIA)B - \kappa\varphi = 0$$

$$\varphi = \frac{NAB}{\kappa} I$$

elde ederiz. O halde, göstergenin sapma açısı kangaldaki akımla doğru orantılıdır. NAB/κ çarpanı, sapmanın metre nin tasarımına da bağlı olduğunu söylemektedir.



Şekil 29.16 Bir hareketli-kangal galvonometrenin kesit görünümü

29.4 YÜKLÜ BİR PARÇACIĞIN DÜZGÜN BİR MANYETİK ALAN İÇERİSİNDEKİ HAREKETİ

12.3 Kesim 29.1 de, bir manyetik alan içerisinde hareket eden yüklü bir parçacığa etkiyen kuvvetin her zaman parçacığın hızına dik ve bu nedenle manyetik alanın parçacık üzerinde yaptığı işin sıfır olduğunu bulduk. Şimdi düzgün bir manyetik alan içerisinde hareket eden pozitif yüklü bir parçacık ele alalım ve bunun hız vektörünün başlangıçta alana *dik* olduğu özel durumu inceleyelim. Manyetik alan yönünün sayfanın *içine doğru* olduğunu varsayalım. Şekil 29.17 yüklü parçacığın, düzlemi manyetik alana dik olan bir çember üzerinde hareket ettiğini göstermektedir.

Bunun nedeni, $\mathbf{F}_B$ manyetik kuvvetin **v** ve **B** ile dik açı yapması ve qvB ye eşit sabit bir büyüklüğe sahip olmasıdır. Şekil 29.17 de gösterildiği gibi, $\mathbf{F}_B$ kuvveti parçacığı saptırdıkça **v** ve $\mathbf{F}_B$ nin yönleri sürekli olarak değişir. $\mathbf{F}_B$ her zaman çemberin merkezine doğru baktığı için **v** nin **yalnız yönünü değiştirebilir, büyüklüğünü değiştiremez.** Dönme yönü, şekil 29.17 de görüldüğü gibi pozitif bir yük için saat yönünün tersidir. q negatif olsaydı, dönme yönü saat yönünde olacaktı. Eşitlik 6.1 i kullanarak bu manyetik kuvveti yüklü bir parçacığı çember üzerinde tutabilmek için gerekli merkezcil kuvvete eşitleyebiliriz.

Ev Deneyi

Bir çubuk mıknatısı, siyah-beyaz TV ekranına yaklaştırıp uzaklaştırın ve resimde neler olduğunu gözleyin. Elektronlar manyetik alanda sapacaklar ve görüntüyü bozacaklardır (DİKKAT: Bunu bir renkli TV veya bilgisayar ekranında denemeyiniz. Bu aletler, bir çubuk mıknatıs ile manyetik hale gelebilecek tipik metalik yüzeylere sahiptirler. Böyle durumlarda tamirhaneler, ekrana "manyetik mayin siperleri" yerleştirirler.

Bu kuvvet, m kütlesi ile v^2/r merkezcil ivmesinin çarpımıdır. Newton'un ikinci yasasına göre,

$$\sum F = ma_r$$

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (29.13)$$

elde ederiz. Bir başka deyişle, yörüngenin yarıçapı parçacığın çizgisel (doğrusal) momentumu (mv) ile doğru, yükün ve manyetik alanın büyüklüğü ile ters orantılıdır. Dönen yüklü parçacığın açısal hızı, (Eşitlik 10.10 dan)

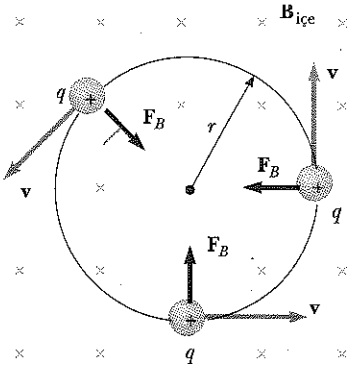
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \qquad (29.14)$$

bağıntısı ile verilir. Parçacığın hareketinin periyodu (bir dolanım için geçen zaman), çemberin çevresinin parçacığın çizgisel hızına bölümüne eşittir:

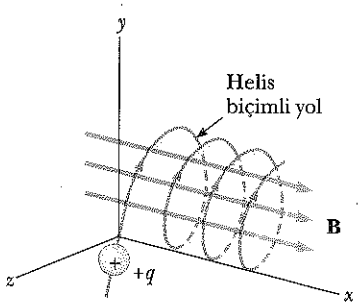
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \qquad (29.15)$$

Bu sonuçlar; dairesel hareketin açısal hızı ve periyodunun, parçacığın çizgisel hızına ve yörüngesinin yarıçapına bağlı olmadıklarını göstermektedir. Açısal hız ω ya çoğu kez **siklotron frekansı** denir. Nedeni, Kesim 29.5 de tartışılacak olan ve *siklotron* denen hızlandırıcıda yüklü parçacıkların bu açısal hızla dolanmalarıdır.

Yüklü bir parçacık, düzgün bir manyetik alan içerisinde, hızı, **B** ile keyfi bir açı yapacak biçimde hareket ederse, yolu bir helistir. Örneğin, Şekil 29.18 de görüldüğü gibi, alan x yönünde ise kuvvetin x yönünde hiçbir bileşeni yoktur ve bu nedenle $a_x = 0$ ve hızın x bileşeni, v_x, sabit kalır. Öte yandan, manyetik kuvvet $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, v_y ve v_z bileşenlerinin zamanla değişmelerine neden olur ve bileşke hareket, ekseni **B** alanına paralel olan bir helistir. Yolun yz düzlemi üzerindeki izdüşümü (x ekseni boyunca bakıldığı zaman) bir çemberdir (yolun xy ve xz düzlemleri üzerindeki izdüşümleri ise birer "sinüzoid" dir!). Bu nedenle, v yerine $v_\perp = \sqrt{v_y^2 + v_z^2}$ konulduğu sürece, 29.13 den 29.15 ye kadar olan eşitlikler halâ geçerli olur.



Şekil 29.17 Yüklü bir parçacığın hızı düzgün bir manyetik alana dik olduğunda, parçacık, **B** ye dik olan bir düzlemde çember biçimli bir yörüngede hareket eder. Yüke etkiyen $\mathbf{F}_B$ manyetik kuvveti, her zaman çemberin merkezine doğru yönelir.



Şekil 29.18 Düzgün bir manyetik alana paralel bir hız bileşeni olan yüklü parçacık, helis biçimli bir yol izler.

ÖRNEK 29.6 Düzgün Bir Manyetik Alana Dik Olarak Hareket Eden Proton

Bir proton, hızına dik 0,35 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan içerisinde 14 cm yarıçaplı bir çember üzerinde hareket ediyor. Protonun çizgisel hızını bulunuz.

Çözüm Eşitlik 29.13 den

$$v = \frac{qBr}{m_p} = \frac{(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C})\ (0{,}35\ \text{T})\ (14 \times 10^{-2}\ \text{m})}{1{,}67 \times 10^{-27}\ \text{kg}}$$

$$= 4{,}7 \times 10^6\ \text{m/s}$$

Alıştırma Bir elektron, aynı çizgisel hızla aynı manyetik alana dik olarak girerse yörüngesinin yarıçapı ne olur?

Cevap $7{,}6 \times 10^{-5}$ m.

ÖRNEK 29.7 Bir Elektron Demetininin Bükülmesi

Düzgün bir manyetik alanın şiddetini ölçmek için tasarlanan bir deneyde, elektronlar 350 voltluk bir potansiyel farkı altında durgun halden hızlandırılırlar. Elektronlar manyetik kuvvetin etkisiyle eğri bir yörünge boyunca hareket ederler. Yörünge yarıçapının 7,5 cm olduğu ölçülüyor. (Şekil 29.19 böyle bir eğrilmiş elektron demetini gösterir.) Manyetik alanın elektron demetine dik olduğu varsayıldığında, (a) manyetik alanın büyüklüğü nedir?

Çözüm Öncelikle, enerjinin korunumu gereği, elektronların kinetik enerjilerindeki artışın potansiyel enerjilerindeki azalışa, $|e|\Delta V$, eşit olması gerektiği gerçeğini kullanarak elektronların süratını bulmalıyız. $K_i = 0$ ve $K_s = mv^2/2$ olduğundan

$$\tfrac{1}{2} m_e v^2 = |e|\Delta V$$

$$v = \sqrt{\frac{2|e|\Delta V}{m_e}} = \sqrt{\frac{2(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C})(350\ \text{V})}{9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg}}}$$

$$= 1{,}11 \times 10^{7}\ \text{m/s}$$

elde ederiz.

$$B = \frac{m_e v}{|e| r} = \frac{(9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg})(1{,}11 \times 10^{7}\ \text{m/s})}{(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C})(0{,}075\ \text{m})}$$

$$= 8{,}4 \times 10^{-4}\ \text{T}$$

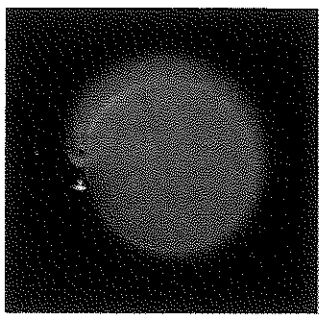
(b) Elektronların açısal hızı nedir?

Çözüm Eşitlik 29.14 ten

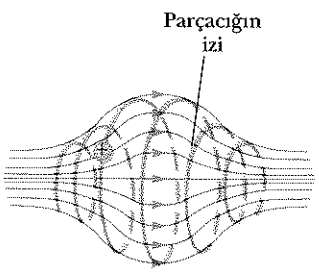
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{1{,}11 \times 10^{7}\ \text{m/s})}{(0{,}075\ \text{m})} = 1{,}5 \times 10^{8}\ \text{rad/s}$$

Alıştırma Elektronların dolanım periyodu nedir?

Cevap 43 ns.



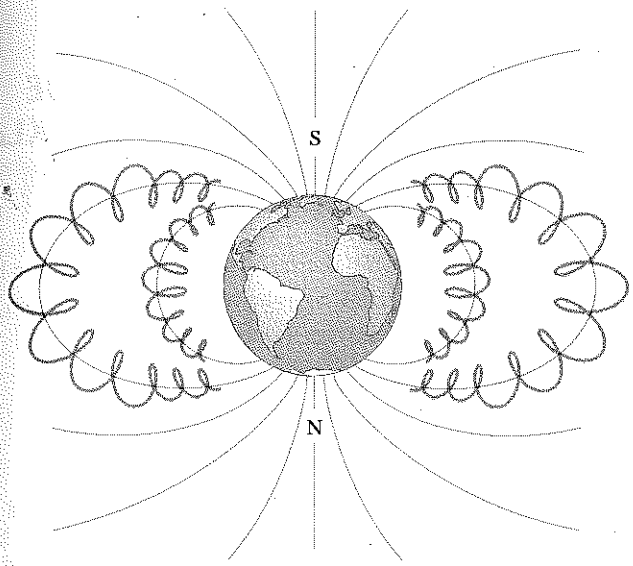
Şekil 29.19 Bir manyetik alanda bir elektron demetinin bükülmesi (*Henry Leap ve Jim Lehman'ın izniyle*)



Şekil 29.20 Mavi çizgilerle temsil edilen düzgün olmayan bir manyetik alan (bir manyetik şişe) içerisindeki bir yüklü parçacık, alanın etrafında spiral çizerek uç noktalar arasında salınım yapar. Şişenin herhangi bir ucu yakınında parçacığa etkiyen manyetik kuvvet, parçacığın merkeze doğru spiral çizmesine neden olan bir bileşene sahiptir.

Yüklü parçacıklar, düzgün olmayan bir manyetik alanda hareket ettiklerinde, hareket oldukça karmaşıktır. Örneğin, Şekil 29.20 deki gibi, uçlarda kuvvetli ortada zayıf bir manyetik alan içerisindeki yüklü parçacıklar, uç noktalar arasında ileri geri salınım hareketi yapabilirler. Bir uçtan harekete geçen bir yüklü parçacık, diğer uca ulaşıncaya kadar alan çizgileri boyunca spiral çizer, diğer uca ulaşınca geri döner ve tekrar spiral çizer. Bu şekillenime *manyetik şişe* denir. Çünkü yüklü parçacıklar içerisinde tuzaklanabilir. Bu manyetik şişe, elektronlardan ve iyonlardan oluşan ve **plazma** adı verilen bir gazı hapsetmek amacıyla kullanılmaktadır. Böyle bir plazma-hapsetme yöntemi, kontrollü çekirdek birleştirme (**füzyon**) sürecini başarmada önemli bir rol oynayabilir. Füzyon reaksiyonu ile hemen hemen sonsuz bir enerji kaynağı elde etmek mümkündür. Ne yazık ki, manyetik şişenin kendi problemleri vardır. Çok sayıda parçacık tuzaklanırsa, parçacıkların birbirleri ile çarpışmaları onların sistemden "sızmalarına" neden olmaktadır.

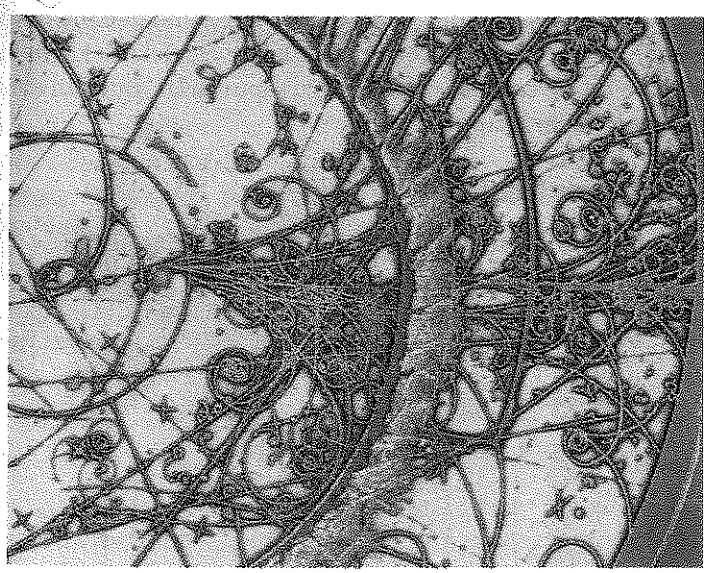
Van Allen ışınım kuşakları, yanlardan dünya'yı saran yüklü parçacıklardan (çoğunlukla elektronlar ve protonlar) oluşur (Şekil 29.21). Dünya'nın düzgün olmayan manyetik alanının tuzakladığı yüklü parçacıklar, Dünya'nın alan çizgilerinin etrafında kutupdan kutuba bir kaç saniye içerisinde spiral çizerler. Bu parçacıklar, genelde güneşten kaynaklanırlar, fakat bazıları yıldızlardan ve uzaydaki diğer gök cisimlerinden gelirler. Bu nedenle, bu parçacıklara *kozmik ışınlar* denir. Kozmik ışınların çoğunu Dünya'nın manyetik alanı saptırır ve bunlar hiç bir zaman atmosfere ulaşamaz. Buna rağmen, bazıları tuzaklanırlar ve bunlar Van Allen kuşaklarını oluştururlar. Bu yüklü parçacıklar kutupların



Şekil 29.21 (a) Dünya'nın düzgün olmayan manyetik alanının tuzakladığı yüklü parçacıklardan oluşan Van Allen kuşakları. Alan çizgileri mavi, parçacıkların yolları ise kırmızı renkle gösterilmiştir.

üzerinde olduklarında bazen Dünya atmosferindeki atomlarla çarpışırlar ve onların görünür ışık yaymalarına neden olurlar. Kuzey yarımkürede görülen O güzelim "Kuzey kutbu fecri" veya "Kuzey Işınımları" nın güney yarımkürede görülen "Güney kutbu fecri" nin kaynağı budur. Van Allan kuşaklarının Dünya yüzeyine en yakın oldukları yerler kutup bölgeleri olduğundan fecirler buralarda görülür. Arasıra, güneş aktiviteleri çok sayıda yüklü parçacığın kuşaklara girmelerine ve Dünya'nın doğal manyetik alan çizgilerinin bozulmasına neden olur. Bu durumlarda daha düşük enlemlerde de zaman zaman "fecir" görülebilir.

12.1 & 12.11



Bu renkçe zenginleştirilmiş fotoğraf, İsviçrede Geneva kenti yakınlarındaki parçacık fiziği laboratuvarı CERN de çekilmiş olup bir kabarcık odasında atom altı parcaçıkların bıraktığı izlerin bir topluluğunu göstermektedir. Bir kabarcık odacığı aşırı derecede ısıtılmış sıvı hidrojenle dolu bir kabdır. Bu sıvı, kabtaki basıncın anî düşmesi ile kısa sürede normal kaynama noktasının üzerine çıkarılır. Bu durumdaki sıvıdan geçen yüklü bir parçacık, yolu üzerindeki sıvı kaynarken, geçtiği yerde küçücük kabarcıklardan oluşan bir iz bırakır. Bu kabarcıklar, farklı tiplerdeki parçacıkların karakteristik yollarını gösteren ince çizgisel izler halinde görülürler. Odacıkta kuvvetli bir manyetik alan bulunduğundan yollar eğriseldir. Sıkıca sarılmış spiral çizgiler elektronlar ve pozitronlardan kaynaklanır. (*Patrice Loiez, CERN/SPL/Foto Araştırmacıları*)

Seçmeli Kesim

29.5 BİR MANYETİK ALAN İÇERİSİNDE HAREKET EDEN YÜKLÜ PARÇACIKLARI İÇEREN UYGULAMALAR

Hem bir **E** elektrik alanı hem de bir **B** manyetik alan içerisinde **v** hızı ile hareket eden bir yük, elektrik kuvveti $q\mathbf{E}$ ve manyetik kuvvet $q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$ nin ikisinin de etkisindedir. Yüke etkiyen toplam kuvvet (Lorentz kuvveti denir),

Lorentz kuvveti

$$\sum \mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \tag{29.16}$$

dir.

Hız Seçici

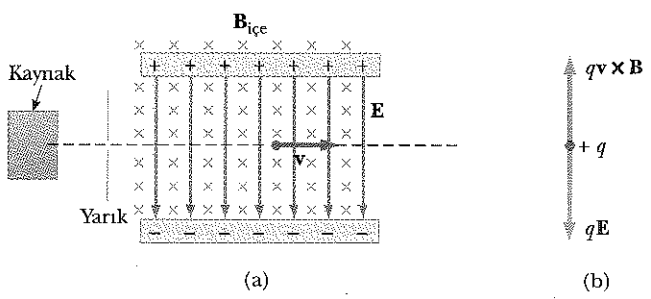
Hareketli yüklü parçacıkları içeren pekçok deneyde, parçacıkların aynı hızla hareket ediyor olmaları oldukça önemlidir. Bu, yönleri Şekil 29.22'de olduğu gibi düzenlenmiş bir elektrik ve bir manyetik alan bileşimi uygulanarak başarılabilir. Düzgün bir elektrik alanı düşey olarak aşağıya doğru yönelmiş (Şekil 29.22a da sayfa düzleminin içinde) düzgün bir manyetik alan ise elektrik alana dik olarak (Şekil 29.22a da sayfa düzleminin içine doğru) uygulanır. q nün pozitif olduğu varsayılırsa, manyetik kuvvet $q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$'nin yukarı, elektrik kuvveti $q\mathbf{E}$ nin ise aşağı yönde olduğunu görürüz. İki alanın büyüklükleri $qE = qvB$ olacak şekilde seçilirse parçacık, alanların bulunduğu bölgede doğrusal bir yatay çizgi boyunca ilerler. $qE = qvB$ ifadesinden,

$$v = \frac{E}{B} \tag{29.17}$$

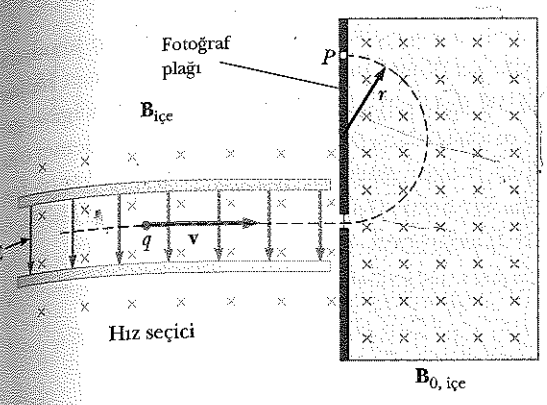
elde ederiz. Birbirine dik elektrik ve manyetik alanların içinden, ancak bu sürata sahip olan parçacıklar sapmadan geçebilirler. Bundan daha büyük süratla hareket eden parçacıklara etkiyen manyetik kuvvet, elektrik kuvvetinden daha şiddetlidir ve bu parçacıklar yukarı doğru saptırılırlar. Bundan daha küçük süratlalar ise aşağı doğru saptırılırlar.

Kütle Spektrometresi

Kütle Spektrometresi, İyonları kütlelerinin yüklerine oranına göre ayıran bir düzenektir. *Bainbridge kütle spektrometresi* denen bir tipde, bir iyon demeti önce bir hız seçiciden geçer ve sonra hız seçicideki manyetik alanla aynı yönde yönelmiş ikinci bir $\mathbf{B}_0$ düzgün manyetik alanına girer (Şek. 29.23). $\mathbf{B}_0$ manye-



Şekil 29.22 (a) Bir hız seçici. Pozitif yüklü bir parçacık, içe doğru bir manyetik alan ile, aşağı doğru bir elektrik alanının aynı anda etkileri altında olduğu zaman, hem aşağı yönlü bir $q\mathbf{E}$ elektrik kuvveti hem de yukarı yönlü bir $q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$ manyetik kuvvetinin etkisindedir. (b) Bu kuvvetler birbirlerini dengelediklerinde, parçacık, alanların içinde yatay bir çizgi boyunca ilerler.



Şekil 29.23 Bir kütle spektrometresi. Pozitif yüklü parçacıklar, önce bir hız seçiciden geçirilir ve sonra içe doğru yönelmiş bir $\mathbf{B}_0$ manyetik alanının bulunduğu bölgeye girerler ve burada manyetik alanının etkisi altında bir yarım çember çizerek P deki fotoğraf filmine çarparlar.

tik alanına girince, iyonlar yarıçapı r olan bir yarım çemberler çizerek P deki bir fotoğrafik flime çarparlar. Eğer iyonlar pozitif yüklü iseler, Şekil 29.23 ün gösterdiği gibi demet yukarı sapar. Öte yandan iyonlar negatif yüklü olurlarsa demet aşağı doğru sapacaktır. 29.13 Eşitliğinden m/q oranını,

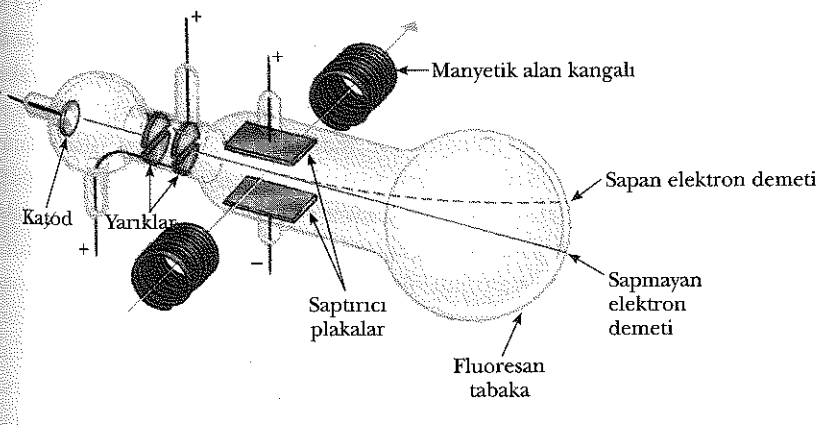
$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

biçiminde ifade edebiliriz. 29.17 Eşitliğini kullanarak

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E} \qquad \textbf{(29.18)}$$

elde ederiz. O halde B, B_0 ve E alanları bilindiğine göre eğrilik yarıçapını ölçerek m/q oranı bulunabilir. Uygulamada, genellikle verilen bir iyonun aynı q yüküne sahip çeşitli izotoplarının kütleleri ölçülür. Böylece, q bilinmese bile kütle oranları bulunabilir.

Bu yöntemin değişik bir biçimi, elektronların e/m_e oranlarını ölçmek için 1897 de Joseph John Thomson (1856–1940) tarafından kullanıldı. Şekil



(a)

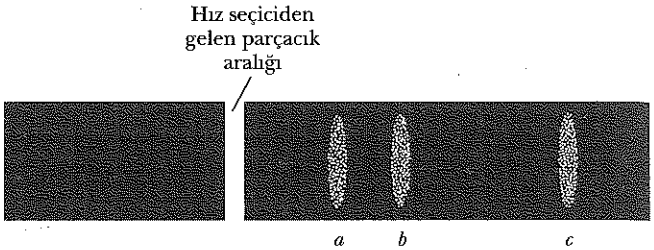
(b)

Şekil 29.24 (a) Thomson'un e/m_e yi ölçen aleti. Elektronlar katoddan hızlandırılır, iki yarıktan geçerler, sonra hem bir elektrik alanı ve hem de bir menyetik alan (elektrik alana dik yönelmiş) etkisinde saparlar. Sapan elektron demeti daha sonra fosforlu bir ekrana çarpar. (b) J.J. Thomson, Cambridge Üniversitesi, Cavendish Laboratuvarında J.J. Thomson'un sağındaki adamın bu kitabın hazırlanışında katkısı olan Johhn W. Jewett'in uzak bir akrabası olan Frank B. Jewett olduğunu belirtmek ilginç olmalı.

29.24a, onun temel aygıtını göstermektedir. Elektronlar katoddan anodlara doğru hızlandırılır, anodlardaki yarıklar bunları tek yönlü bir demet haline getirirler ve sonra dik elektrik ve manyetik alanların bulunduğu bölgeye geçerler. Aynı anda uygulanan E ve B alanları, önce, hiç sapmayan bir demet oluşacak şekilde ayarlanırlar. Sonra B alanı kapatılırsa, E alanı yalnız başına fosforlu ekran üzerinde ölçülebilir bir demet sapması oluşturur. E ve B'nin ölçülen değerleri ve sapmanın büyüklüğünden, yükün kütleye oranı, e/m_e saptanabilir. Bu ilginç deneyin sonuçları, doğanın temel bir parçacığı olarak elektronların keşfini temsil eder.

Sınama Sorusu 29.6

Şekil 29.23 de gösterilen gibi bir kütle spektrometresinden alınan bir fotoğraf filmi tab edildiğinde, Şekil 29.25 de gösterilen üç desen gözlenir. Desenleri oluşturan parçacıkları sürat ve m/q oranlarına göre sıralayınız.

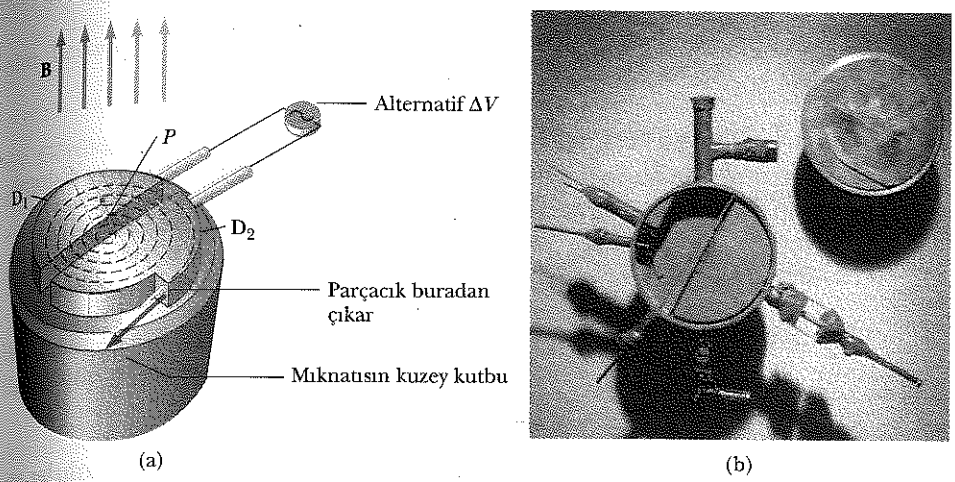


Şekil 29.25

Hızlandırıcı (Siklotron)

Siklotron, yüklü parçacıkları çok yüksek süratlara kadar hızlandırabilen bir makinedir. Elektrik ve manyetik kuvvetlerin her ikisi de bir anahtar rolü oynar. Siklotrondan çıkan yüksek enerjili parçacıklar, atomik çekirdekleri bombalamak ve böylece araştırmacıların gereksinim duyduğu çekirdek tepkimelerini oluşturmak için kullanılırlar. Birçok hastane, teşhis ve tedavide kullanılabilen radyoaktif maddeleri oluşturmak amacıyla, siklotron olanaklarını kullanmaktadır.

Bir siklotronun şematik çizimi Şekil 29.26 da görülmektedir. Yükler *D'ler* (dîler) denen iki yarım çember şeklindeki D_1 ve D_2 kaplarının içinde hareket ederler. D'lere yüksek frekanslı bir değişken (alternatif) gerilim uygulanır ve bir elektromıknatısın sağladığı düzgün bir manyetik alan D'lere dik olarak yönlendirilir. Mıknatısın merkezine yakın yerdeki P'de serbest bırakılan pozitif bir iyon yarım çember şeklindeki bir yörüngede dolanır (şekildeki kesikli kırmızı çizgi) ve $T/2$ zaman sonra aralığa geri ulaşır. Burada T, iki D etrafında bir kere tur atmak için gereken zaman olup Eşitlik 29.15 ile verilir. Uygulanan V geriliminin frekansı, iyonların bir yarım dolanımı için geçen zaman içerisinde D'lerin kutuplanışı tersine dönecek şekilde ayarlanır. Uygulanan gerilim D_2, D_1 den ΔV kadar daha *düşük* bir potansiyelde olacak biçimde ayarlanırsa, iyon, aralığı geçerken D_2 ye doğru hızlanır ve kinetik enerjisi $q\Delta V$ kadar artar. Bu nedenle iyon, daha sonra D_2 içerisinde daha büyük yarıçaplı bir yarım çember üzerinde hareketine devam eder. $T/2$ zaman sonra, yine aralığa ulaşır. Bu zamana kadar, D'lerin arasındaki gerilimin yönü yine değişir (bu yüzden şimdi D_1 negatif olur) ve aralığı geçerken iyona bir başka itme verilir; hareket, her yarım dönüde iyon $q\Delta V$ ye eşit bir ek kinetik enerji kazanacak biçimde devam eder. Yüksek enerjili iyonlar, yörüngelerinin yarıçapı hemen hemen D'lerin yarıçapına ulaştığında, sistemi çıkış yarığından terk ederler. Siklotro-



Şekil 29.26 (a) Siklotron, bir iyon kaynağı, uçları arasına alternatif bir gerilim uygulanan iki D ve düzgün bir manyetik alandan oluşur. (Şekilde mıknatısın güney kutbu gösterilmemiş). Kırmızı kesik eğri çizgiler parçacıkların yollarını temsil ederler. (b) 1934 de E. O. Lawrence ve M. S. Livingston'un icad ettiği ilk siklotron. (*California Üniversitesi, Lawrence Berkeley Laboratuvarının izniyle*)

nun çalışma ilkesinin, T nin, iyonun süratından ve çembersel yörüngenin yarıçapından bağımsız oluşuna dayandığına dikkat etmek gerekir.

İyonun siklotrondan çıktığı zamanki kinetik enerjisini, D'lerin R yarıçapı cinsinden elde edebiliriz. 29.13 Eşitliğinden $v = qBR/m$ bulunur. Böylece, kinetik enerji

$$K = \frac{1}{2}\, mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \qquad \textbf{(29.19)}$$

eşitliği ile verilir.

İyonların enerjisi yaklaşık 20 MeV'u geçtiği zaman, göreceli etkiler devreye girer. (Bu tür etkiler, Bölüm 39 da tartışılacak). Bu nedenle T artar ve dolanan iyonlar uygulanan gerilimle aynı fazlı kalmazlar. Dolanan iyonlarla aynı fazlı kalacak şekilde uygulanan gerilimin periyodunu değiştirmek suretiyle bu problemi ortadan kaldıran hızlandırıcılar yapılabilmektedir.

Web

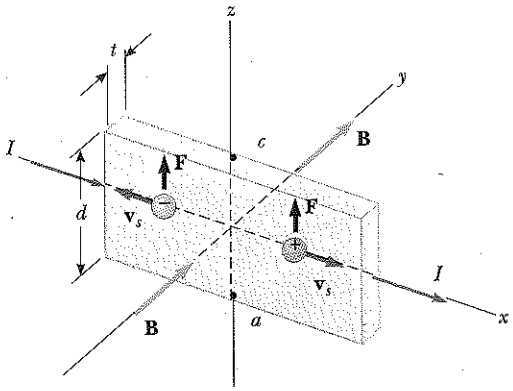
Bu hızlandırıcılarla ilgili daha fazla bilgi için, **http://www.fnal.gov** veya **http://www.CERN.ch** sitesine girin. CERN 1990 lardan buyana Dünya'nın her tarafındaki fizikçilerin oluşturduğu web'ler hakkında da bilgi verir.

Seçmeli Kesim

29.6 HALL OLAYI

Akım taşıyan bir iletken bir manyetik alan içine yerleştirildiğinde, hem akıma hem de manyetik alana dik yönde bir potansiyel farkı üretilir. Bu olay ilk olarak 1879 da Edwin Hall tarafından gözlendi ve *Hall olayı* olarak bilinir. Olay yük taşıyıcılarının manyetik alandan ötürü gördükleri manyetik kuvvet nedeniyle, iletkenin bir tarafına doğru sapmalarından kaynaklanır. Hall olayı, yük taşıyıcıların işareti ve yoğunluğu hakkında bilgi verir ve manyetik alanların büyüklüklerini ölçmek için de kullanılabilir.

Hall olayını gözlemeye yarayan düzenek, Şekil 29.27 de görüldüğü gibi x yönünde bir I akımı taşıyan yassı şerit biçiminde bir iletkenden oluşur. y yönünde düzgün bir **B** manyetik alanı uygulanır. Yük taşıyıcıları, negatif x yönünde $\mathbf{v}_s$ sürükleme hızı ile hareket eden elektronlar ise, yukarı doğru bir



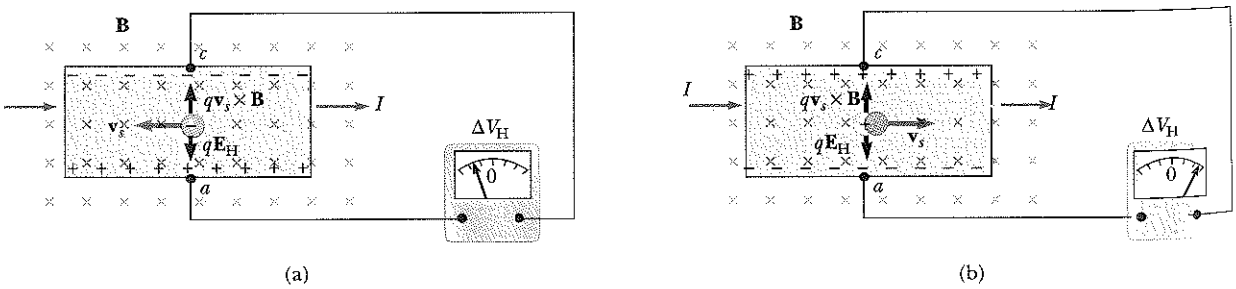
Şekil 29.27 Hall olayını gözlemek için, akım-taşıyan bir iletkene bir manyetik alan uygulanır. Şekilde gösterildiği gibi, I, x yönünde ve $\mathbf{B}$, y yönünde olduğu zaman, hem pozitif ve hem de negatif yük taşayıcıları manyetik alan içinde yukarı doğru saparlar. Hall gerilimi, a ve c noktaları arasında ölçülür.

$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ manyetik kuvvetinin etkisinde kalarak yukarı doğru saptırılırlar ve üst kenarda toplanırlar ve böylece alt kenarda da aynı sayıda pozitif yükler bırakmış olurlar (Şek.29.28a). Kenarlarda yükün bu birikimi, yük ayırımından kaynaklanan elektrostatik alan nedeniyle yük taşıyıcılarının gördüğü kuvvet, manyetik kuvveti dengeleyinceye kadar sürer. Bu denge koşuluna ulaşıldığında, elektronlar artık yukarı doğru sapmazlar. Şekil 29.28 de gösterildiği gibi iletkenin kenarları arasına bağlanan hassas bir voltmetre ya da potansiyometre bu iki kenarı arasında oluşturulan ve **Hall gerilimi** denen potansiyel farkını ölçebilir. Yük taşıyıcıları pozitif ise ve bu nedenle Şekil 29.27 ve Şekil 29.28b deki gibi pozitif x yönünde hareket ediyorlarsa, bunlar da $q\mathbf{v}_s \times \mathbf{B}$ ile verilen *yukarı doğru* bir manyetik kuvvet etkisinde kalırlar. Bu kuvvet, pozitif yüklerin üst kenarda birikmesine ve alt kenarda negatif yük fazlalığına neden olur. Bu nedenle bu nümunede oluşan Hall geriliminin işareti, elektronların sapmasından kaynaklanan gerilimin işaretinin tam tersidir. Bu nedenle, yük taşıyıcılarının işareti, Hall geriliminin kutuplanışının ölçümünden yararlanılarak belirlenebilir.

Hall gerilimi için bir bağıntı bulurken, öncelikle yük taşıyıcılarına etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğünün qv_sB olduğuna dikkat edilmelidir. Denge halinde, bu kuvvet elektrostatik kuvvet qE_H ile dengelenir. Burada E_H, yük ayırımından kaynaklanan elektrik alanın büyüklüğüdür. (Bazen *Hall alanı* da denir). Buna göre,

$$qv_sB = qE_H$$

$$E_H = v_sB$$



Şekil 29.28 (a) Bir Hall olayı aygıtında yük taşıyıcıları negatif olduğunda, üst kenar negatif yüklü hale gelir ve c noktası a dan daha düşük bir potansiyelde olur. (b) Yük taşayıcıları pozitif olduğunda ise üst kenar pozitif yüklü hale gelir ve c noktası a dan daha yüksek bir potansiyelde olur. Her iki durumda da, kenarlar tam olarak yüklendikten sonra, yani; yükleri birleştirmeye çalışan elektrostatik kuvvet qE_H ile manyetik kuvvet qvB arasında bir denge oluştuğunda yük taşayıcıları artık saptırılamazlar.

olur. İletkenin genişliği d ise Hall gerilimi

$$\Delta V_H = E_H d = v_s B d \qquad (29.20)$$

dir. Görüldüğü gibi, d ve B bilindiği takdirde ölçülen Hall gerilimi, yük taşıyıcılarının sürüklenme hızını verir. Yük taşıyıcıları yoğunluğu, n, nümunedeki akımı ölçerek bulunabilir. Eşitlik 27.4 den yararlanarak sürüklenme hızı,

$$v_s = \frac{I}{nqA} \qquad (29.21)$$

biçiminde verilebilir. Burada A iletkenin kesit alanıdır. 29.21 Eşitliğini 29.20 Eşitliğinde yerine koyarak,

$$\Delta V_H = \frac{IBd}{nqA} \qquad (29.22)$$

elde ederiz. $A = td$ olduğundan (burada t numunenin kalınlığıdır), Eşitlik 29.22,

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_H IB}{t} \qquad (29.23)$$

Hall voltajı

biçiminde de ifade edebiliriz. Burada $R_H = 1/nq$ niceliği **Hall katsayısı** dır. 29.23 Eşitliği, uygun biçimde kalibre edilen bir numunenin bilinmeyen bir manyetik alanın büyüklüğünü ölçmek amacıyla kullanılabileceğini gösterir.

Eşitlik 29.23 te, nq'nun dışındaki tüm nicelikler ölçülebileceğinden Hall katsayısı için derhal bir değer elde edilebilir. R_H'nin işareti ve büyüklüğü yük taşıyıcılarının işaretini ve yoğunluğunu verir. Metallerin çoğunda yük taşıyıcılar elektronlardır. Hall olayı ölçümlerinden elde edilen yük yoğunlukları Li, Na, Cu ve Ag gibi yük taşıyıcı olarak atomları birer elektron veren metaller için, hesaplanan değerlerle iyi bir uyum içerisindedir. Bu durumda n, yaklaşık olarak, birim hacimdeki iletim elektronlarının sayısına eşittir. Fakat, bu klasik model, Fe, Bi ve Cd gibi metaller ya da silisyum ve germanyum gibi yarıiletkenler için geçerli değildir. Bu uyumsuzluklar, ancak katıların kuantum özelliğine dayanan bir modelle açıklanabilir.

Web

1980'de Klaus von Klitzing Hall gerilimi-nin kuantize olduğunu keşfetti. 1985'te bu keşfinden ötürü Nobel Ödülü aldı. Kuantumlu Hall olayının tartışması ve sonuçlarını öğrenmek için aşağıdaki Web sitesi-ne girin:
http://www.saunderscollege.com/physics/

ÖRNEK 29.8 Bakır İçin Hall Olayı

1,5 cm genişliğinde ve 0,1 cm kalınlığında dikdörtgensel bir bakır şerit 5A'lik bir akım taşımaktadır. 1,2 T değerinde bir manyetik alan, şeride dik olarak uygulandığına göre, oluşan Hall, gerilimi (voltajını) bulunuz.

Çözüm İletim için atom başına bir elektron katkısı olduğunu varsayarsak, yük yoğunluğunu $n = 8{,}49 \times 10^{28}$ elektron/m^3 (Örnek 27.1) olarak alabiliriz. Bu değer ve verilen veriler Eşitlik 29.23 te yerlerine konulduğunda

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{(5{,}0\ \text{A})(1{,}2\ \text{T})}{(8{,}49 \times 10^{28}\ \text{m}^{-3})(1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C})(0{,}001\ \text{m})}$$

$$\Delta V_H = 0{,}44\ \mu\text{V}$$

bulunur. İyi iletkenlerde böylesine çok küçük bir Hall gerilimi beklenen bir olgudur. Bu hesaplamada, nümunenin genişliğinin gereksiz olduğuna dikkat edeiniz.

Yarı iletkenlerde n, bir değerli metallerdekinden (akıma atom başına bir elektron veren) çok daha küçüktür ve daha büyük Hall voltajı elde edilir. Çünkü ΔV_H, n ile ters orantılıdır. Bu tür maddeler için genellikle 1,0 mA mertebesindeki akımlar yeterlidir. Bakır şeritle aynı ölçülerde bir silisyum parçası gözönüne alınız. $n = 1{,}0 \times 10^{20}$ elektron/m^3 olduğundan $B = 1{,}2$ T ve $I = 0{,}1$ mA alınırsa $\Delta V_H = 7{,}5$ mV elde edilir. Bu büyüklükte bir gerilim kolaylıkla ölçülebilir.

ÖZET

Bir **B manyetik alan** içerisinde **v** hızı ile hareket eden bir q yüküne etkiyen manyetik kuvvet

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \tag{29.1}$$

bağıntısı ile verilir. Öyle ki, manyetik kuvvet, hem parçacığın hızına hem de alana dik yöndedir. Manyetik kuvvetin *büyüklüğü*,

$$F_B = |q|vB \sin\theta \tag{29.2}$$

ile verilir. Burada θ, **v** ile **B** arasındaki küçük açıdır. **B** nin (SI) deki birimi **tesla** (T) dır, burada 1T = 1 N/A·m

Yüklü bir parçacık bir manyetik alan içerisinde hareket ederse, manyetik kuvvetin parçacık üzerinde yaptığı iş sıfırdır. Çünkü yerdeğiştirme kuvvetin yönüne her zaman diktir. Manyetik alan parçacığın hızının yönünü değiştirebilir fakat süratini asla değiştiremez.

Uzunluğu L olan düz bir iletken bir I akımı taşırken, düzgün bir **B** manyetik alanı içerisine konulduğunda etkiyen kuvvet,

$$\mathbf{F}_B = I\mathbf{L} \times \mathbf{B} \tag{29.3}$$

eşitliği ile verilir. Burada **L** nin yönü akımın yönündedir. ve $|\mathbf{L}| = L$.

I kadar akım taşıyan keyfi biçimli bir tel, bir manyetik alan içerisine konulursa, çok küçük bir $d\mathbf{s}$ elemanına etkiyen kuvvet,

$$d\mathbf{F}_B = I\,d\mathbf{s} \times \mathbf{B} \tag{29.4}$$

ile verilir. Tele etkiyen toplam kuvveti bulmak için, her noktada **B** ve $d\mathbf{s}$ nin değişebileceğini unutmamak kaydıyla, Eşitlik 29.4 ün integralini almak gerekir.

Düzgün bir manyetik alan içerisindeki akım-taşıyan keyfi biçimli bir iletkene etkiyen kuvvet,

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L}' \times \mathbf{B} \tag{29.7}$$

eşitliği ile verildiğini gösterir. Burada **L'**, iletkenin bir ucundan ötekine yönelen bir vektördür. İntegral işlemi, Eşitlik 29.4 ün kapalı bir ilmek boyunca integrali sıfır olduğu için düzgün bir *dış* manyetik alan içerisinde akım taşıyan herhangi bir *kapalı* ilmeğe etkiyen net kuvvet *sıfırdır*.

I akımı taşıyan bir ilmeğin **manyetik dipol momenti** ($\boldsymbol{\mu}$)

$$\boldsymbol{\mu} = I\mathbf{A} \tag{29.10}$$

dır. Burada alan vektörü **A**, ilmeğin düzlemine dik olup, $|\mathbf{A}|$ ilmeğin yüzey alanına eşittir. $\boldsymbol{\mu}$ nün SI sistemindeki birimi A·m^2 dir.

Bir akım ilmeği, düzgün bir **B** dış manyetik alanı içerisine konulduğunda üzerine etkiyen tork ($\boldsymbol{\tau}$)

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \tag{29.11}$$

ve bir manyetik alan içerisindeki bir manyetik dipolün potansiyel enerjisi

$$U = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \tag{29.12}$$

bağıntısı ile verilir.

Yüklü bir parçacık, başlangıç hızı alana dik olacak biçimde düzgün bir manyetik alana girerse, düzlemi, manyetik alana dik olan bir çember üzerinde hareket edecektir. Çembersel yolun r yarıçapı;

$$r = \frac{mv}{qB} \tag{29.13}$$

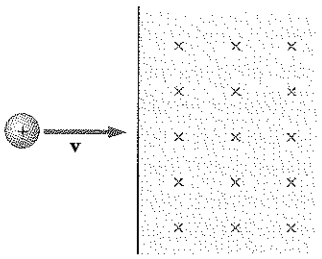
bağıntısı ile verilir. Burada m parçacığın kütlesi, q ise yüküdür. Yüklü parçacığın açısal hızı

$$\omega = \frac{qB}{m} \qquad (29.14)$$

ile verilir.

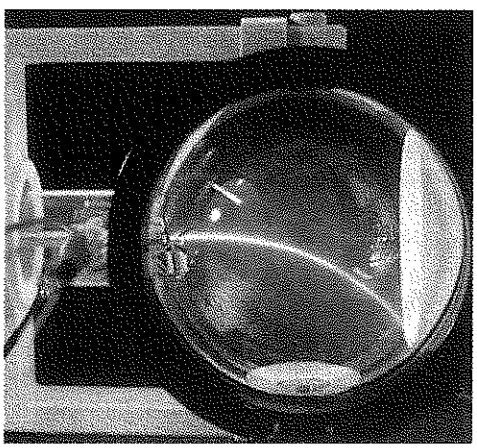
SORULAR

1. Negatif z yönünde manyetik alan bulunan bir bölgede belli bir anda, proton, pozitif x yönünde hareket etmektedir. Manyetik kuvvetin yönü nereye doğrudur? Proton, pozitif x yönündeki hareketine devam edecek midir? Açıklayınız.
2. Yüklü iki parçacık, hızlarına dik bir manyetik alana gönderiliyor. Parçacıklar zıt yönlerde saparlarsa, bunlar hakkında ne söyleyebilir siniz?
3. Yüklü bir parçacık uzayın herhangi bir bölgesinde doğru bir çizgi boyunca ilerleyebiliyorsa, o bölgede manyetik alanın sıfır olduğunu söyleyebilir misiniz?
4. Bir elektronun bir protonu bu sayfaya kadar izlediğini ve bu anda aniden kağıt düzleminin içine doğru dik bir manyetik alan uygulandığını varsayınız. Parçacıklara ne olacaktır?
5. Bir manyetik alanla bir elektrik alanı birbirinden ayırdetmek için, hareketli bir yüklü parçacığın hareketi nasıl kullanılabilir? Tartışmanızı doğrulayan belirgin bir örnek veriniz.
6. Elektrik ve manyetik kuvvetlerin birçok benzerlik ve farklarını sıralayınız.
7. Şu ifadeyi doğrulayınız: "Yüklü bir parçacığın sürâtini sabit (yani, zamana bağlı olmayan) bir manyetik alanla, değiştirmek mümkün değildir."
8. Yukarıdaki ifadenin ışığında, bir siklotronda manyetik alanın işlevi nedir?
9. Akım-taşıyan bir iletken, düzgün bir manyetik alan içerisine belirli bir biçimde yerleştirilirse, hiçbir manyetik kuvvet etkisinde kalmaz. Açıklayınız.
10. Düzgün bir manyetik alan içerisindeki bir akım ilmeğini dönemeyecek biçimde yönlendirmek mümkün müdür? Açıklayınız.
11. Bir akım ilmeği, uzayın verilen bir bölgesindeki manyetik alanın varlığını belirlemek amacıyla nasıl kullanılabilir?
12. Düzgün bir manyetik alan içerisindeki bir pusula iğnesine etkiyen *net* kuvvet nedir?
13. Bir manyetik dipole net bir kuvvet etki ettirebilmek için, ne tür bir manyetik alan gerekir? Bu net kuvvetin yönü nedir?
14. Şekil Q29.14 te gösterildiği gibi yatay olarak hareket eden bir proton, hızına dik olan düzgün bir manyetik alanın bulunduğu bölgeye girerse, daha sonraki hareketini açıklayınız. Aynı koşullar altında bir elektron nasıl davranacaktı?
15. Bir manyetik şişede tutulan yüklü parçacıkların hızının yönünü, şişenin uçlarında ne geriye çevirir? (*İpucu:* Alan çizgilerinin birbirlerine iyice yaklaştığı bir bölgede bu parçacıklara etkiyen manyetik kuvvetin yönünü bulunuz.)
16. Siklotronda, hızları farklı olan parçacıklar bir D içindeki yarım çemberlik yolculuğu niçin aynı sürede tamamlarlar?



Şekil Q29.14

17. *Kabarcık odası,* bir manyetik alan içerisine daldırılan ve içerisinden geçen yüklü parçacıkların izlerini gözlemeye yarayan bir aygıttır. İzlerden bazıları spiral, diğerleri ise doğru çizgiler halinde ise parçacıklar hakkında ne söyleyebilirsiniz?
18. Bir sabit manyetik alan, duran bir elektronu harekete geçirebilir mi? Nasıl?
19. Manyetik alanları ölçmek için Hall olayını kullanan bir manyetik algılayıcı (prob) tasarımladığınızı, yapım için verilen bir maddeyi kullanmak zorunda olduğumuzu ve algılayıcıyı zaten yeteri kadar ince yaptığımızı varsayın. Verilen bir manyetik alan şiddeti için, üretilen Hall geriliminin artırılması nasıl yapılabilir?
20. Şekil Q29.20 de gösterilen elektron demeti, sağa doğru gönderilmektedir. Demet akım-taşıyan bir çift kangalın oluşturduğu bir manyetik alanın etkisiyle aşağı doğru sapar. (a) Manyetik alanın yönü nereye doğrudur? (b) Kangallardaki akımın yönü ters çevrilseydi demete ne olacaktı?



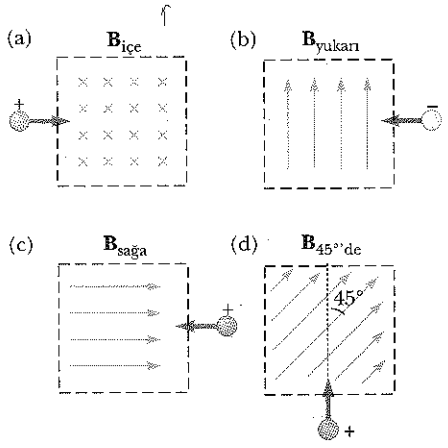
Şekil Q29.20 *(Central Scientific Company'nin izniyle)*

PROBLEMLER

1, 2, 3 = kolay, orta, zorca; □ = Bu problemin tam çözümü *Öğrenci Çözümlü El Kitabı ve Çalışma Kılavuzunda* bulunabilir = Çözüm **http = // www.saunderscollege.com/physics/** de bulunabilir = Problemi çizmek için bilgisayar kullanmak faydalı olabilir = "Etkileşimli Fizik" paket programında bulunabilir = Sayısal/sembolik problem çifti

Kesim 29.1 Manyetik Alan

1. Şekil P29.1 de gösterildiği gibi, yüklü parçacıkların manyetik alanlara girerken başlangıçtaki sapma yönlerini bulunuz.

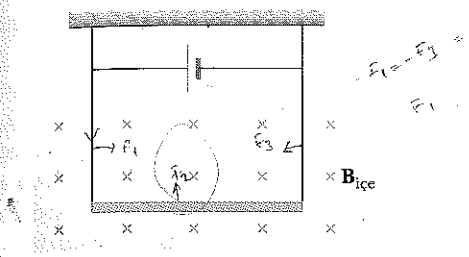


Şekil P29.1

2. Dünya'nın ekvatoruna yakın bir elektron gözönüne alınız. Hızı (a) aşağı, (b) kuzeye, (c) batıya, ya da (d) güneydoğuya doğru yönelmişse hangi yöne doğru sapar?
3. Bir manyetik alana dik olarak, pozitif x ekseni boyunca hereket eden bir elektron, negatif y yönünde bir manyetik sapma yaptığına göre bu bölgede manyetik alanın yönü nedir?
4. Bir proton, $+y$ yönündeki 0,300 T'lık bir manyetik alanın yönü ile 37,0° açı yapan bir doğrultuda $3,00 \times 10^6 \text{m/s}^2$ süratla ilerlemektedir. (a) Protona etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü ve (b) protonun ivmesi nedir?
5. Bir proton, bir **B** düzgün manyetik alanına dik olarak $1,00 \times 10^7$ m/s süratla hareket etmekte iken hızı $+z$ yönünde olduğu bir anda $+x$ yönünde $2,00 \times 10^{13} \text{m/s}^2$ lik bir ivme hissettiğine göre alanın büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.
6. Bir elektron, durgun halden 2400 V luk bir gerilim altında hızlandırılır ve sonra 1,7 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan bulunan bir bölgeye girer. Bu yüke etkiyen (a) maksimum ve (b) minimum manyetik kuvvetlerin değerleri nedir?
7. Ekvatorda Dünya yüzeyine yakın yerlerde iyi bir havada manyetik alan yaklaşık olarak 50,0 μT olup kuzeye ve elektrik alanı ise 100 N/C olup aşağı doğrudur. Bu çevrede ani hızı doğuya doğru $6,00 \times 10^6$m/s olan bir elektrona etkiyen, yerçekimi kuvvetini, elektrik ve manyetik kuvvetleri bulunuz.
8. Net yükü $Q = 5,00\mu$C olan 30,0g kütleli metal bir top, $v = 20,0$ m/s lik bir süratla yatay olarak bir pencereden dışarı fırlatılıyor. Pencere yerden $h = 20,0$ m yukarıda ve büyüklüğü $B = 0,010$ T olan bir düzgün ve yatay manyetik alan topun yörünge düzlemine dik olduğuna göre yere çarpmadan hemen önce topa etkiyen manyetik kuvveti bulunuz.
9. 1,7 T lik bir manyetik alan içerisinde 4×10^6 m/s lik bir hızla hereket eden bir proton, büyüklüğü $8,2 \times 10^{-13}$ N olan bir manyetik kuvvet etkisinde kaldığına göre alanla protonun hızı arasındaki açı nedir?
10. Düzgün elektrik ve manyetik alanların içerisindeki bir elektronun hızı 1,20 km/s (pozitif x yönünde) ve ivmesi $2,00 \times 10^{12}$ m/s^2 (pozitif z yönde) dir. Eğer elektrik alanı pozitif z yönünde ve 20,0 N/C büyüklüğünde ise, bölgedeki manyetik alan hakkında neyi bulabilirsiniz?
11. Bir proton, manyetik alanın $\mathbf{B} = (\mathbf{i} + 2\mathbf{j} - 3\mathbf{k})$ T ile verildiği bir bölgede $\mathbf{v} = (2\mathbf{i} - 4\mathbf{j} + \mathbf{k})$ hızı ile hareket ederse, bu yüke etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğü nedir?
12. Bir elektron $\mathbf{B} = (1,40\mathbf{i} + 2,10\mathbf{j})$T ile verilen düzgün bir manyetik alanın içine atılıyor, hızı $\mathbf{v} = 3,70 \times 10^5\mathbf{j}$ m/s olduğunda elektrona etkiyen kuvvetin vektörel ifadesini bulunuz.

Kesim 29.2 Akım-Taşıyan Bir İletkene Etkiyen Manyetik Kuvvet

13. Birim uzunluğunun kütlesi 0,500 g/cm olan bir tel yatay olarak güneye doğru 2,00 A'lık bir akım taşımaktadır. Bu teli düşey olarak yukarı doğru kaldırabilmek için gerekli manyetik alanın yön ve minimum büyüklüğü ne olmalıdır?
14. Bir tel 2,4 A lik bir kararlı akım taşımaktadır. Telin x ekseni boyunca 0,75 m lik düz kısmı, $\mathbf{B} = 1,6\mathbf{k}$ T ile verilen düzgün bir manyetik alan içerisinde bulunduğuna ve akım $+x$ yönünde geçtiğine göre, telin bu kısmına etkiyen kuvvet ne kadardır?
15. Uzunluğu 2,80m olan bir tel, büyüklüğü 0,390T olan düzgün manyetik alan bulunan bir yerde, 5,00 A'lik bir akım taşımaktadır. Manyetik alan ile akım yönü arasındaki açı (a) 60,0°, (b) 90,0° ve (c) 120° ise tele etkiyen manyetik kuvvetin büyüklüğünü hesaplayınız.
16. Şekil P29.16 daki gibi, iki esnek telle asılan bir iletkenin birim uzunluğunun kütlesi 0,04 kg/m dir. İletkenin bulunduğu bölgede sayfa düzleminin içine doğru 3,6 T büyüklüğünde bir manyetik alan var-

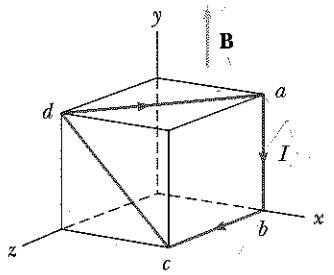


Şekil P29.16

sa, askı tellerindeki gerilmenin sıfır olabilmesi için iletkendeki akımın büyüklüğü ve yönü ne olmalıdır?

17. Çizgisel yük yoğunluğu 1,00 g/m olan bir çok uzun düzgün telin Dünya'yı manyetik ekvatorda sardığını varsayın. Bu bölgede Dünya'nın manyetik alanı 50 μT ve yatay olarak kuzeye doğru olsun. Teli yerin hemen üzerinde havada tutabilmek için telden geçmesi gereken akımın büyüklüğü ve yönü nedir?

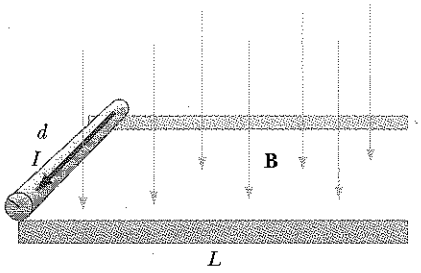
18. Şekil P29.18 deki kübün her kenarı 40 cm dir. Telin dört düz kısmı —*ab*, *bc*, *cd* ve *da*— gösterildiği gibi I = 5A lık akım taşıyan kapalı bir ilmek oluşturmaktadır. Pozitif y yönünde B = 0,02 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan bulunduğuna göre, her kısma etkiyen kuvvetin yönünü ve büyüklüğünü bulunuz.



Şekil P29.18

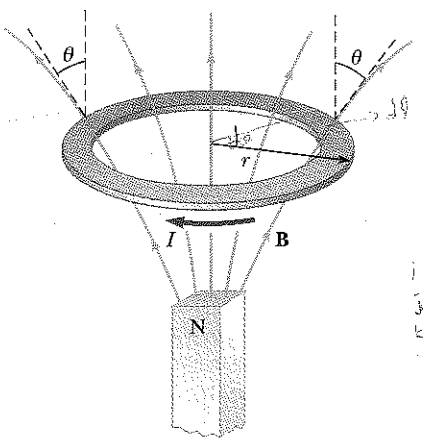
19. **Tarama Problemi.** 0,720 kg kütleli ve 6,0 cm yarıçaplı bir çubuk uzunlukları 45,0 cm ve aralarındaki uzaklık d = 12,0 cm olan paralel iki ray üzerinde durmaktadır (Şekil P29.19). Çubuk gösterilen yönde I = 48,0A'lik bir akım taşımakta ve kaymaksızın raylar boyuncaa yuvarlanabilmektedir. Eğer çubuğa ve raylara dik olarak 0,240 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan uygulanırsa durgun halden harekete geçen çubuğun rayları farkederkenki sürati ne olur?

20. **Tarama Problemi.** Kütlesi m, yarıçapı R olan bir çubuk uzunlukları L ve aralarındaki uzaklık d olan iki paralel rayın üzerinde durmaktadır (Şekil P29.19). Çubuk gösterilen yönde I = 48,0 A'lik bir akım taşımakta ve kaymaksızın raylar boyunca yuvarlanabilmekte. Eğer bir **B** düzgün manyetik alanı hem çubuğa ve hem de raylara dik olarak uygulanırsa durgun halden harekete geçen çubuğun rayları terkederken ki sürati nedir?



Şekil P29.19 Problem 19 ve 20

WEB 21. *Düzgün olmayan bir manyetik alan, bir dipole net bir manyetik kuvvet uygular.* Şekil P29.21 de gösterildği gibi, I akımı taşıyan r yarıçaplı yatay bir iletken halkanın altına kuvvetli bir manyetik alan yerleştiriliyor. **B** manyetik alanı halkanın bulunduğu yerde düşeyle θ açısı yaparsa, halkaya etkiyen bileşke kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir?



Şekil P29.21

22. Georgia, Atlanta'da Dünya'nın manyetik alanı yatayın 60,0° altında kuzeye doğru 52,0μT olsun. Kuzey-güney dik düzleminde bulunan bir dükkan penceresinin diyagonal iki köşesi arasında uzanan bir neon tüpünden 35,0 mA'lik bir akım geçmektedir. Akım tüpe, pencerenin alt güney köşesinden girer, kuzeye doğru 1,40 m ve yukarı doğru 0,850 m de bulunan karşı köşeden çıkar. Bu iki nokta arasında, ışık yayan tüp DONUTS yazısını gösterir. "Durum 1" olarak kanıtlanan teoremi kullanarak tüpe etkiyen toplam vektörel manyetik kuvveti bulunuz.

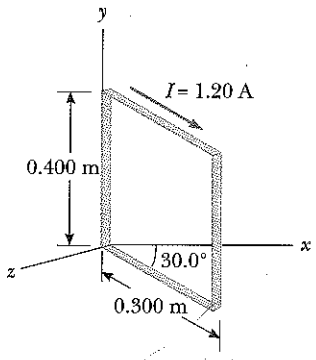
Kesim 29.3 Düzgün Bir Manyetik Alanda Akım İlmeğine Etkiyen Tork

23. Çevresi 2 m olan çember biçimli tek bir ilmekten 17 mA lik bir akım geçerken, ilmek düzlemine paralel olarak 0,8 T büyüklüğünde bir manyetik alan uy-

gulanıyor. (a) Akım ilmeğinin manyetik momentini hesaplayınız. (b) Manyetik alanın ilmeğe uyguladığı torkun büyüklüğü nedir?

24. Küçük bir çubuk mıknatıs, 0,25 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alanın içine asıldığında, etki eden maksimum tork $4{,}6 \times 10^{-3}$ N·m dir. Çubuk mıknatısın manyetik momentini hesaplayınız.

25. Çok sıkı sarılmış 100 sarımdan oluşan dikdörtgen biçimli bir ilmeğin boyutları 0,4 m ve 0,3 m dir. İlmek, y ekseni boyunca menteşelenmiş olup, ilmek düzlemi x ekseni ile 30° açı yapmaktadır. (Şek. P29.25). Sarımlardan şekilde gösterildği yönde 1,2 A değerinde akım geçtiği zaman, x ekseni boyunca uygulanan 0,8 T lik düzgün bir manyetik alanın ilmeğe etkidiği torkun büyüklüğü nedir? İlmeğin beklenen dönme yönü nedir?



Şekil P29.25

26. Kütlesi 0,100 kg ve toplam uzunluğu 4,00 m olan uzun bir tel parçasından bir kenarının uzunluğu 0,100 m olan küresel bir kangal yapılmış. Kangal yatay bir kenarı boyunca menteşelenmiş ve 3,40 A'lik bir akım taşımakta iken büyüklüğü 0,0100T olan düşey bir manyetik alana yerleştirilmiş. (a) Kangal dengeye ulaştığında kangal düzleminin düşeyle yaptığı açıyı bulun. (a) Denge halinde kangala etkiyen manyetik kuvvetten kaynaklanan torku bulunuz.

27. Uzunluğu 40,0 cm olan bir telden 20,0 A'lik bir akım geçmektedir. Bu tel bir ilmek biçiminde büküldükten sonra normal şiddeti 0,520T olan bir manyetik alana dik olacak şekilde yerleştirilmiş. Eğer tel (a) bir eşkenar üçgen, (b) bir kare ve çember biçiminde bükülmüşse ilmeklere etkiyen torklar ne olur? (d) Hangi tork en büyüktür.

28. Dipol momenti $\boldsymbol{\mu}$ olan bir akım ilmeği **B** düzgün bir manyetik alanı içerisine yerleştirildiğinde potansiyel enerjisinin $U = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$ ile verildiğini kanıtlayınız. Bir elektrik dipolünün bir elektrik alan içerisindeki potansiyel enerjisi ile ilgili tartışmadan (Bölüm 26) yararlanabilirsiniz.

29. Bir pusula iğnesinin manyetik moneti 9,70 mA · m^2 dir. Bulunduğu yerde Dünya'nın manyetik alanı yatayın 48,0° altında kuzeye doğru 55,0 μT büyüklüğünde olduğuna göre, (a) Pusula iğnesinin minimum ve maksimum potansiyel enerjiye sahip olduğu yönelimleri belirleyiniz. (b) Maksimum potansiyel enerjiye sahip olduğu yönelime getirebilmek için ne kadar iş yapılmalıdır?

30. Bir tel, 10 cm çaplı bir çember haline getirilip 3,00 mT büyüklüğünde düzgün bir manyetik alan içine yerleştiriliyor. Telden 5 A lik bir akım geçirildiğinde (a) akım-taşıyan ilmeğe etki edebilen maksimum torku (b) farklı yönelimler için ilmeğin sahip olduğu potansiyel enerji aralığını bulunuz.

Kesim 29.4 Düzgün Bir Manyetik Alandaki Yüklü Bir Parçacığın Hareketi

31. Yerin manyetik alanı belirli bir yerde, dik ve aşağı doğru yönelmiş olup 50,0 μT büyüklüğündedir. Bir proton $6{,}2 \times 10^6$ m/s lik bir hızla bu alan içerisinde batıya doğru hareket ediyor. (a) Bu yüke alanın uyguladığı manyetik kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir. (b) Bu protonun izlediği çember şeklindeki yayın yarıçapı nedir?

32. Bir tek elektronunu kaybetmiş pozitif bir iyonun kütlesi $3{,}2 \times 10^{-26}$ kg dır. Durgun haldeki iyon 833 V luk bir potansiyel farkı ile hızlandırıldıktan sonra büyüklüğü 0,92 T olan bir manyetik alana dik olarak giriyor. İyonun alan içerisindeki yörüngesinin yarıçapını hesaplayınız.

33. **Tarama Problemi.** Bir elektron durmakta olan ikinci bir elektronla elektrik olarak çarpıştırıldıktan sonra, yörüngelerinin yarıçapları 1,00 cm ve 2,40 cm olarak ölçülüyor. Yörüngeler, büyüklüğü 0,0440 T olan bir düzgün manyetik alan a dik olduklarına göre vuran elektronun enerjisini keV cinsinden bulun.

34. Sabit bir manyetik alana dik olarak çembersel bir yörüngede hareket eden bir proton bir turunu 1,00μs de tamamladığına göre manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

35. Bir proton (yükü $+e$, kütlesi m_p), bir döteron (yükü $+e$, kütlesi $2m_p$) ve bir alfa parçacığı (yükü $+2e$, kütlesi $4\ m_p$) ortak bir ΔV potansiyel farkı ile hızlandırıldıktan sonra hızları düzgün bir **B** manyetik alanına dik olacak biçimde giriyorlar. Yarıçapları r_d ve r_α'yı r_p cinsinden bulunuz.

36. **Tarama Problemi.** Bir elektron, büyüklüğü 1,00 mT olan bir sabit manyetik alana dik çembersel bir yörüngede hareket etmektedir. Elektronun çemberin merkezine göre açısal momentumu $4{,}00 \times 10^{-25}$ J·s ise, (a) çembersel yörüngenin yarıçapını (b) elektronun hızını bulunuz.

37. 5,2 T büyüklüğündeki manyetik alanda bulunan protonun siklotron frekansını hesaplayınız.

38. Yüklü ve m kütleli bir iyon, ΔV potansiyel farkı ile durgun halden hızlandırıldıktan sonra düzgün bir manyetik alanın (iyonun hızına dik) etkisiyle R yarıçaplı bir yarım çember çizecek biçimde saptırılıyor. Kütlesi m' olan çift yüklü bir iyon, aynı potansiyel farkı altında hızlandırılıp aynı manyetik alanda yarıçapı $R' = 2R$ olan bir yarımçember çizecek şekilde saptırılıyor. Bu verilere göre iyonların kütlelerinin oranı nedir?

39. Yıldızlararası uzayda, bir kozmik-ışın protonunun enerjisi 10 MeV olup bu proton, Merkürü'ün Güneş'in etrafındaki yörüngesinin yarıçapına (5,8 × 10^{10} m) eşit yarıçaplı bir çember şeklindeki yörüngede dolanmaktadır. Uzayın o bölgesindeki manyetik alan ne kadardır?

40. 4,6 × 10^5 m/s hızla hareket eden bir-değerli pozitif bir iyon kabarcık odasının bir resimde, 1,8 T lık manyetik alanına dik bir doğrultu boyunca 7,94 mm yarıçaplı bir çembersel-iz bıraktığına göre, bu iyonun kütlesini (atomik kütle birimi olarak) bulunuz ve bundan yararlanarak ne olduğunu belirtiniz.

(Seçmeli)

Kesim 29.5 Bir Manyetik Alanda Hareket Eden Yüklü Parçacıklara Ait Uygulamalar

41. Bir hız seçici, $\mathbf{E} = E\mathbf{k}$ ve $\mathbf{B} = B\mathbf{j}$ ifadesiyle verilen elektrik ve manyetik alanlardan oluşmaktadır. B = 0,015 T ise, pozitif x ekseni boyunca hereket eden 750 eV enerjili bir elektronun sapmadan geçebilmesi için E nin değeri ne olmalıdır?

42. Bir değerli uranyum –238 iyonları, 2 kV luk bir potansiyel farkı altında hızlandırılarak, hızlarına dik olan 1,2 T lık düzgün bir manyetik alana giriyorlar. (a) Bu iyonların izledikleri çembersel yolun yarıçapını bulunuz. (b) Aynı şeyi uranyum –235 için yapın. Bu yörünge yarıçaplarının oranı, hızlandırma gerilimine ve manyetik alan şiddetine nasıl bağlıdır?

43. Şekil 29.23 de şeması verilen kütle spektrometresini gözönüne alınız. Hız seçicinin plakaları arasındaki elektrik alanı 2500 V/m ve hem hız seçicideki ve hem de saptırma odasındaki manyetik alanın büyüklüğü 0,035 T dır. Kütlesi $m = 2{,}18 \times 10^{-26}$ kg olan bir yüklü bir iyon için sistemdeki yörüngenin yarıçapını hesaplayınız.

44. 5,2 T lık bir manyetik alan kullanarak, protonları 34 MeV luk enerjilere hızlandırabilmek amacıyla tasarımlanan bir siklotron için gereken yarıçap ne kadardır?

45. Protonları hızlandırmak için tasarlanan bir siklotronun manyetik alanı 0,45 T ve yarıçapı 1,2 m dir. (a) Siklotron frekansı ne kadardır? (b) protonların kazanabileceği maksimum sürat ne kadardır?

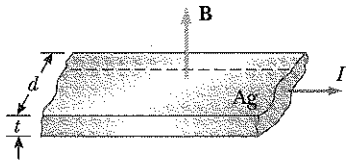
46. Illinois, Batavia'da bulunan Fermilab hızlandırıcısında, momentumu 4,8 × 10^{-16} kg·m/s olan protonlar, yukarı yönlü bir manyetik alan sayesinde yarıçapı 1 km olan çember şeklindeki yörüngede tutulur. Protonları bu yörüngede tutan manyetik alan ne kadardır?

WEB 47. Bir televizyondaki resim tübünde, elektrik saptırma plakalarından ziyade manyetik saptırma kangalları kullanılır. Bir elektron demetinin, 50 kV'luk bir potansiyel farkı altında hızlandırıldıktan sonra 1 cm genişlikte bir bölgede düzgün bir manyetik alandan geçtiğini varsayınız. Ekran, kangalların merkezinden 10 cm uzağa yerleştirilmiş olup 50 cm genişliktedir. Alan kapatıldığında, elektron demeti ekranın merkezine çarpar. Elektron demetini ekranın kenarına saptırabilmek için nekadarlık bir alan şiddeti gereklidir?

(Seçmeli)

Kesim 29.6 Hall Olayı

48. Kalınlığı t = 0,20 mm olan yassı gümüş bir şerit, Şekil P29.48 de gösterildiği gibi şeride dik olan düzgün bir manyetik alanı, Hall olayı ile ölçmek amacıyla kullanılıyor. Gümüşün Hall katsayısı $R_H = 0{,}84 \times 10^{-10}$ m^3/C dur. (a) Gümüşteki yük taşıyıcılarının etkin yoğunluğu, n, nedir? (b) I = 20 A'lik bir akım, ΔV_H = 15 μV olan bir Hall gerilimi oluşturursa, uygulanan manyetik alanın büyüklüğü ne dir?



Şekil P29.48

49. Bir Hall olayı ölçümünde, deneysel örnek olarak 0,4 cm kalınlığında bir iletken kullanılıyor. 1,8 T'lık bir manyetik alan içerisinde 21 A'lık bir akım kullanıldığında ölçülen Hall gerilimi 35 μV ise, iletkenin Hall katsayısını hesaplayınız.

50. 50 A'lık akım taşıyan 0,330 mm kalınlığında yassı bir bakır şerit, düzlemine dik 1,3 T büyüklüğünde düzgün bir manyetik alanın içine yerleştirilmiştir. Şeridin enine, bir tarafından diğer tarafına 9,6 μV'luk bir Hall gerilimi ölçülmüşse bakır şeritdeki serbest elektronların yük yoğunluğu nedir? Bu sonuç, atom başına serbest elektronların etkin sayısının kaç tane olduğunu göstermektedir?

51. Hall olayını kullanarak yerin manyetik alanını ölçmek amacıyla tasarımlanan bir deneyde, kalınlığı 0,5 cm olan bakır bir çubuk doğu batı yönü boyunca yerleştirilmiştir. İletkendeki 8 A lık bir akım, 5,1 × 10^{-12} V'luk bir Hall gerilimi oluşturuyorsa, yerin manyetik alanının büyüklüğü nedir? ($n = 8{,}48 \times 10^{28}$ elektron/m^3 ve çubuğun düzleminin **B**'ye dik olacak biçimde döndürüldüğünü varsayınız.)

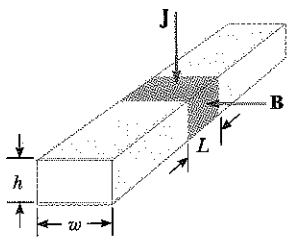
52. Bir Hall-olayı probu (algılayıcı), 120 mA lik bir akımda çalışmaktadır. Prob 0,08 T lık düzgün bir manyetik alana yerleştirildiğinde 0,7 μV değerinde bir Hall gerilimi oluşturmaktadır. (a) Bilinmiyen bir manyetik alanı ölçerken, Hall gerilimi 0,33 μV dur. Bilinmeyen alanın büyüklüğü ne kadardır? (b) Numunenin **B** yönündeki kalınlığı 2 mm ise, yük-taşıyıcı yoğunluğunu bulunuz (herbir yük e kadardır).

EK PROBLEMLER

53. Bir elektron büyüklüğü 0,100 T olan bir manyetik alanın bulunduğu bölgeye doğrusal sınırına dik olarak girer. Alanın yönü elektronun hızına dik olduğuna göre; (a) Elektronun yörüngesi bir yarım çember biçiminde ise alanın bulunduğu bölgeyi ne kadar zamanda terkeder? (b) Alanın içine maksimum girme derinliği 2,00 cm ise elektronun kinetik enerjisini bulunuz.

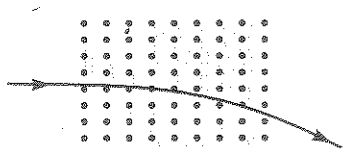
54. 10,0 A'lik akım taşımakta olan 0,200 kg'lık bir metal çubuk, aralarındaki uzaklık 0,500 m olan iki yatay ray üzerinde kaymaktadır. Eğer çubukla raylar arasındaki kinetik sürtünme katsayısı 0,100 ise, çubuğun sabit bir süratla hareket edebilmesi için nasıl bir dik manyetik alan gerekmektedir?

55. Sodyum 99 C° de erir. Sıvı sodyum, mükemmel bir ısı iletkeni olup bazı nükleer reaktörlerin çekirdeğini soğutmak amacıyla kullanılır. Sıvı sodyum, bir manyetik alanda hareket eden yüklü bir parçacığa etkiyen kuvvet prensibine dayanan pompalarla borulardan geçirilebilir. Prensip şöyledir: sıvı sodyumun, genişliği w ve yüklekliği h olan bir dikdörtgensel kesit alanlı yalıtkan boruda olduğunu, boruya dik olan düzgün bir manyetik alanın L uzunluğunda bir kesimini etkilediğini varsayalım (Şek. P29.55). Boruya ve manyetik alana dik olan bir elektrik akımı, sıvı sodyumda J ile gösterilen bir akım yoğunluğu oluşturur. (a) Bu düzeneğin, niçin sıvı üzerinde boru boyunca yönelen bir kuvvet oluşturduğunu açıklayınız. (b) Sıvının manyetik alan içerisinde kalan kesiminin JLB'ye eşit bir basınç artışı hissettiğini gösteriniz.



Şekil P29.55

56. 5 MeV kinetik enerjili protonlar, pozitif x yönünde hareket etmekte iken Şekil P29.56 da gösterildiği gibi $x = 0$ dan $x = 1$ m ye kadar yayılan ve kağıt düzlemine dik olan $\mathbf{B} = (0{,}050\,\mathbf{k})$ T manyetik alanına giriyor (a) manyetik alandan çıkarken protonların momentumunun y bileşenini hesaplayınız. (b) Proton demetinin başlangıçtaki hız vektörü ile alanı terk ettikten sonraki hız vektörü arasındaki α açısını bulunuz. (*İpucu*: Göreceli etkileri ihmal ediniz ve 1 eV = $1{,}60 \times 10^{-19}$ J olduğunu anımsayınız).



Şekil P29.56

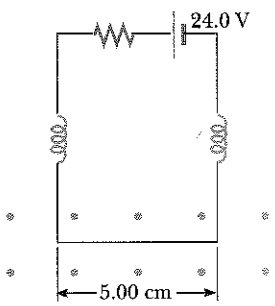
57. (a) $\mathbf{v} = v_i\mathbf{i}$ hızı ile $+x$ yönünde hareket etmekte olan bir proton bir $\mathbf{F} = F_i\mathbf{j}$ manyetik kuvvetini hissettiğine göre bu bilgiden $\mathbf{B}$ hakkında neyi söyleyip neyi söyleyemeyeceğinizi açıklayınız. (b) Aynı manyetik alan içerisinde $\mathbf{v} = -v_i\mathbf{i}$ hızı ile hareket eden bir protona etkiyen kuvvet F_i cinsinden ne olacaktır? (c) Aynı manyetik alan içerisinde $\mathbf{v} = v_i\mathbf{i}$ hızı ile hareket eden bir elektrona etkiyen kuvvet ne olacaktır?

58. **Tarama Problemi.** Lineer kütle yoğunluğu 1 g/cm olan bir tel, aralarındaki sürtünme katsayısı 0,2 olan yatay bir yüzey üzerinde durmaktadır. Telden doğuya doğru 1,5 A akım geçmekte iken, kuzeye doğru yatay olarak hareket ettiğine göre, telin bu şekilde hareket etmesine olanak sağlayan *en küçük* manyetik alanın büyüklüğü ve yönü ne olmalıdır?

59. $q = 3{,}2 \times 10^{-19}$ C büyüklüğünde pozitif bir yük, düzgün bir manyetik alan ve düzgün bir elektrik alanın birlikte bulundukları bölgede $\mathbf{v} = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j} - \mathbf{k}$ m/s hızla hareket etmektedir. (a) $\mathbf{B} = (2\mathbf{i} + 4\mathbf{j} + \mathbf{k})$ T ve $\mathbf{E} = (4\mathbf{i} - \mathbf{j} - 2\mathbf{k})$ V/m ise hareket eden yüke etkiyen toplam kuvveti hesaplayınız. (b) Kuvvet vektörünün pozitif x ekseni ile yaptığı açı ne kadardır?

60. Işık hızının yarısı bir hızla hareket eden bir kozmik ışın protonu, ekvator düzleminde dosdoğru dünyanın merkezine doğru ilerlediğine göre bu proton Dünya'ya çarpacak mı? Dünya'nın manyetik alanının ekvatoral düzlemde düzgün ve 50,0 μT olduğunu ve dünya yüzeyinden dışa doğru $1{,}3 \times 10^7$ m ye kadar yayıldığını varsayınız. Bu manyetik alanda söz konusu protonun yörüngesinin eğrilik yarıçapını hesaplayınız. Göreceli etkileri ihmâl ediniz.

61. Kütlesi 10 g ve uzunluğu 5 cm olan doğru bir tel, kendisiyle kapalı bir devre oluşturan iki özdeş yayla asılıyor (Şek. P29.61). Telin ağırlığının etkisiyle yaylar 0,5 cm kadar uzamaktadır. Devrenin toplam direnci 12 Ω dur. Kağıt düzleminden dışa doğru bir manyetik alan uygulandığı zaman yayların 0,3 cm daha uzadıkları gözleniyor. Manyetik alanın büyüklüğü ne kadardır? (Devrenin üst kısmı sabittir.)



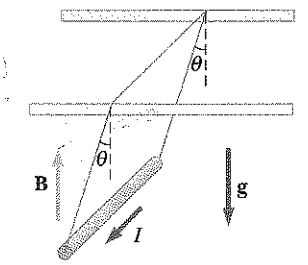
Şekil P29.61

62. Bir ev-tipi elektrikli karıştırıcının (miksır) bir elektrik motoru vardır. Motoru, bir dış sürekli mıknatısın oluşturduğu bir manyetik alan bölgesinde elektrik akımı taşıyan yassı bir çembersel kangal olarak modelleyin. Motorun çalışmasını anlayabilmeniz için yalnız bir an düşünmeye gereksiniminiz var (motorları, Bölüm 31 de yine ele alacağız). Kesim 29.3 de betimlendiği gibi, kangal, manyetik alan tork uygula-

diği için hareket eder. Manyetik alanın, kangala etkiyen torkun, kangaldaki akımın, kangalın yüzey alanı ve sarım sayısının 29.11 Eşitliği ile birbirlerine bağlı oluşlarını dikkate alarak yaklaşık değerlerini hesaplayınız. Motora verilen giriş gücünün $\mathcal{P} = I\Delta V$ ile tanımlanan elektrik, kullanışlı çıkış gücünün ise $\mathcal{P} = \tau\omega$ ile verilen mekanik güç olduğuna dikkat ediniz.

63. Birim uzunluğunun kütlesi 0,010 kg/m olan bir metal çubuk, I = 5,00A lik bir akım taşımaktadır. Çubuk, Şekil P29.63 de görüldüğü gibi düzgün bir düşey manyetik alan içerisinde iki telle asılmıştır. Denge halinde, teller düşeyle θ = 45,0° lik bir açı yaparsa, manyetik alanın büyüklüğünü bulunuz.

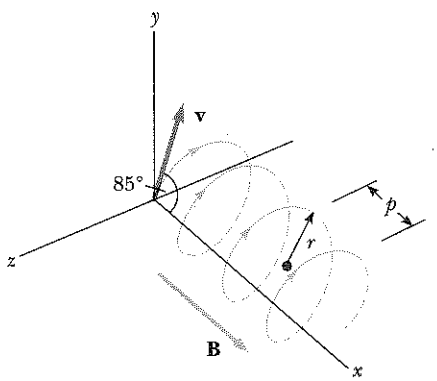
64. Birim uzunluğunun kütlesi μ olan bir metal çubuk, I akımı taşımaktadır. Çubuk Şekil P29.63 de gösterildiği gibi düzgün düşey bir manyetik alan içerisinde iki telle asılmıştır. Denge halinde, teller düşeyle θ açısı yaparlarsa, manyetik alanın büyüklüğünü veren bağıntıyı bulunuz.



Şekil P29.63 Problem 63 ve 64

65. Bir siklotron bazen Kesim 44.6 da ele alacağımız karbon tarihlendirmesi için de kullanılır. Karbon-14 ve Karbon-12 iyonları, tarihlendirilecek olan maddenin bir örneğinden elde edilip siklotronda hızlandırılırlar. Siklotronun manyetik alanının büyüklüğü 2,40 T ise iki iyonun Siklotron frekansları arasındaki fark nedir?

66. 0,15 T şiddetinde düzgün bir manyetik alan, pozitif x ekseni boyunca yönelmiştir. 5×10^6 m/s hızla hareket etmekte olan bir pozitronun x ekseni ile 85° açı yapan yönde alana girdiğini varsayalım (Şek. P29.66). Kesim 29.4 te açıklandığı gibi parçacığın hareketinin bir helis olması beklenmektedir. Yörüngenin (a) p adımını ve (b) r yarıçapını hesaplayınız.

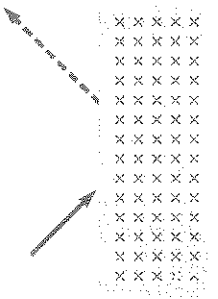


Şekil P29.66

67. Aralarındaki Coulomb çekim kuvvetinin etkisiyle bir elektronun, bir protonun etrafında $R = 5{,}29 \times 10^{-11}$ m yarıçaplı değişmeyen bir yörüngede dolandığını varsayınız. Dolanan yükü bir akım ilmeği olarak değerlendirmek suretiyle, sistem, elektronun manyetik momentine dik olarak yönelmiş 0,400 T büyüklüğünde bir alanda bulunduğunda, oluşan torku hesaplayınız.

68. Bir tek yükü olan ağır bir iyonun 1,5 ms de büyüklüğü 5×10^{-2} T olan düzgün bir manyetik alanda beş defa dolandığı gözlendiğine göre iyonun kütlesini kg cinsinden hesaplayınız (Yaklaşık).

69. Sayfa düzleminde hareket eden bir protonun kinetik enerjisi 6 MeV dır. Şekil P29.69 da gösterildiği gibi alanın doğrusal sınırıyla $\theta = 45°$ açı yapacak biçimde büyüklüğü B = 1 T olan içe doğru bir manyetik alana girerse (a) protonun alana girdiği nokta ile alandan çıkacağı nokta arasındaki x uzaklığını bulunuz. (b) Protonun alanı terk ettiği hız vektörü ile alanın sınırı arasındaki θ' açısını hesaplayınız.



Şekil P29.69

70. Tablo P29.70, manyetik alanları ölçmeye yarayan bir "prob" için, Hall gerilimi ve buna karşılık gelen manyetik alanın ölçümlerini göstermektedir. (a) Bu verilerin grafiğini çiziniz ve iki değişken arasında bir ilişki kurunuz. (b) Ölçümler 0,2 A lik bir akımla

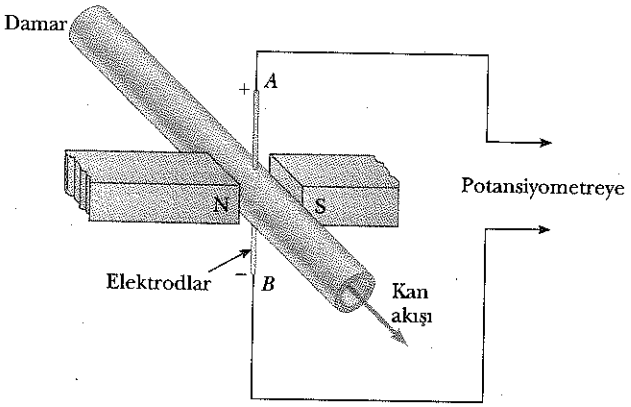
TABLO P29.70

$\Delta V_H(\mu V)$	B(T)
0	0,00
11	0,10
19	0,20
28	0,30
42	0,40
50	0,50
61	0,60
68	0,70
79	0,80
90	0,90
102	1,00

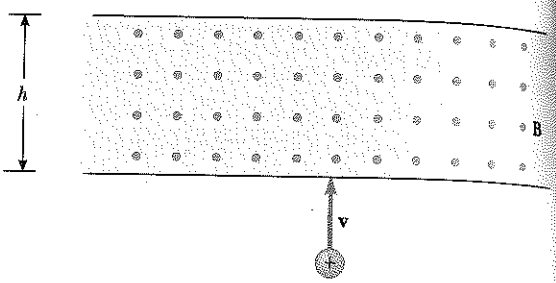
alınmışsa ve iletken, yük-taşıyıcı yoğunluğu $10^{26}/m^3$ olan bir maddeden yapılmışsa, örneğin kalınlığı ne kadardır?

71. Bir kalp cerrahı, bir elektromenyetik akış metresi (Şekil P29.71) kullanarak bir ana damardan geçen kanın akış hızını ölçer. A ve B elektrodları iç çapı 3,00 mm olan kan damarının dış yüzeyine temas etmektedir. (a) Manyetik alanın büyüklüğü 0,040 T olduğunda elektrodlar arasında 160 μV luk bir *emk* oluştuğuna göre kanın süratını bulunuz. (b) Gösterildiği gibi A elektrodunun pozitif olduğunu kanıtlayınız. *emk* işareti acaba kandaki hareketli iyonların çoğunlukla pozitif veya negatif yüklü oluşlarına bağlı mıdır? Açıklayınız.

72. Şekil P29.72 de belirtildiği gibi kütlesi m ve yükü pozitif q olan bir parçacık başlangıçta $v\mathbf{j}$ hızı ile yukarı doğru hareket ediyor ve koordinatların başlangıcından $y = 0$ ile $y = h$ arasındaki bölgede bulunan ve sayfa düzleminden dışa doğru yönelmiş olan bir B düzgün manyetik alanına giriyor. (a) Parçacığın $y = h$'ye ancak ulaşabildiği kritik v değeri nedir? Bu koşul altında parçacığın yörüngesini betimleyin ve son hızını bulun. (b) Eğer v kritik değerinden azsa parçacığın yörüngesini ve son hızını belirleyiniz. (c) kritik değerinden büyükse, parçacığın yörüngesini ve son hızını belirlemeye çalışın.



Şekil P29.71



Şekil P29.72

SINAMA SORULARININ CEVAPLARI

29.1 Sıfır. Çünkü alanın yüke uyguladığı manyetik kuvvet her zaman yükün hızına diktir. Dolayısı ile manyetik alan yük üzerinde hiçbir zaman iş yapamaz: $W = \mathbf{F}_B \cdot d\mathbf{s} = (\mathbf{F}_B \cdot \mathbf{v})\,dt = 0$. İş, kuvvetin hareket yönünde bir bileşeni olmasını gerektirir.

29.2 Etkilemez. Bir yüke bir manyetik alanın uyguladığı manyetik kuvvet, alana göre parçacığın hızı ile orantılıdır. Eğer yük durgunsa (problemdeki gibi), manyetik kuvvet yoktur.

29.3 (c), (b), (a), (d). Örnek 29.2'nin gösterdiği gibi, telin manyetik alana dik "etkin uzunluğu" ile ilgilenmeliyiz, bir başka deyişle, telin kesip attığı "manyetik alan gölgesinin" uzunluğu. (c) için, telin 4 m'si alana diktir. Kısa düşey parçalara hiç manyetik kuvvet etkilemez, çünkü onların akımları alana paraleldir. (b) deki tel alana peş peşe paralel ve dik kısa bir çok yatay ve düşey parçalara ayrıldığında, alana dik olan ve dolayısıyla kuvvet hisseden yatay parçaların toplamının 3,5 m olduğunu görürüz. Sonra (a) gelir; telin 3 m'si etkin olarak alana diktir. Öte yandan (d) deki telin yalnız 2 m'si bir kuvvet hisseder. Çünkü 2 m ile 4 m arasındaki kısmı sayfa düzleminden dışa doğru bir kuvvet hissederken 4 m ile 2 m arasındaki kısmına eşit büyüklükte fakat sayfa düzleminin içine doğru bir kuvvet etkir ve toplamları sıfır olur.

29.4 ③ kenarı daha kuvvetli bir manyetik alan bölgesinde olduğundan ① kenarından daha büyük bir kuvvet hisseder: $F_3 > F_1$. Bu nedenle bu iki kuvvetten kaynaklanan torkun yanı sıra ilmeğe aşağı doğru bir net kuvvet etkir.

29.5 (c), (b), (a). İlmeklerin hepsinde aynı yüzey alanını çevreledikleri ve aynı kısmı taşıdıkları için, hepsi içinde $\boldsymbol{\mu}$'nün büyüklüğü aynıdır. (c) için, $\boldsymbol{\mu}$ yukarı doğru yönelmiş ve manyetik alana diktir ve $\tau = \mu B$ dir. Bu mümkün olabilen maksimum torkdur. $\boldsymbol{\mu}$ ve $\mathbf{B}$ nin bundan sonra gelen büyük vektörel çarpımı (b) durumunda ortaya çıkar. Burada $\boldsymbol{\mu}$ sağ yukarı doğru yönelmiş (Şekil 29.13 deki gibi). Son olarak (a) daki ilmeğin $\boldsymbol{\mu}$ sü $\mathbf{B}$ yönünde yöneldiğinden tork sıfırdır.

29.6 Hız seçisi her üç tip parçacığında aynı sürata sahip olmalarını gerektirir. Kütlelerin veya yüklerin bireysel değerlerini bulamayız, ancak parçacıkları m/q oranlarına göre sıralayabiliriz. Eşitlik 29.18, en büyük yarıçaplı çemberde hareket eden parçacığın en büyük m/q oranına sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle, en büyükten en küçüğe doğru m/q sıralaması c, b, a dır.